



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA DEL RÍO PALTITURE

Andrea Marroquín-Liu

Piura, marzo de 2016

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Marroquín, A. (2016). *Balance hídrico superficial de la subcuenca del río Paltiture* (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



“Balance hídrico superficial de la subcuenca del río Paltiture”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Andrea Milagros Marroquín Liu

Asesor: Magíster Clara Marina Farías Zegada

Piura, Marzo 2016

Agradezco a mis padres y a Daniela, por el apoyo incondicional en todo momento, y a mi tío Juan Carlos Liu, por la información brindada, que sin su ayuda esta tesis no hubiera sido posible.

Prólogo

La cuenca del río Tambo, ubicada entre los departamentos de Arequipa, Moquegua y Puno al sur del Perú, es una de las cuencas más agrestes de la zona árida peruana. Posee dos ríos tributarios principales: el río Paltiture y el río Vizcachas.

Actualmente la cuenca del río Tambo abastece del recurso hídrico al valle de Tambo y al departamento de Moquegua, a través del Proyecto Especial Pasto Grande, el cual comprende el almacenamiento de las aguas del río Vizcachas mediante el reservorio Pasto Grande y la derivación de sus aguas hacia la cuenca del río Moquegua, ubicada al sureste de la cuenca del Tambo. Esta derivación ha ocasionado problemas entre la población del valle de Tambo, distrito de Islay departamento de Arequipa, y la población de Moquegua, ya que ha ocasionado la disminución del caudal en el río Tambo, elevando la cantidad de sales contaminantes en el río, la cual se hace más notoria en época de estiaje.

En el Decreto Supremo N°002-2008 de Agricultura, correspondiente a “Reservan aguas superficiales a favor del Proyecto Especial Pasto Grande del Gobierno Regional Moquegua” hace mención sobre la construcción de un embalse de compensación para el valle de Tambo.

Este embalse, conocido como “Represa Paltiture”, sería la solución para la problemática que hay entre la población del valle y la de Moquegua, el cual será utilizado en los meses de estiaje.

En este contexto, la presente tesis está orientada a la elaboración del estudio hidrológico de la subcuenca del río Paltiture, con la realización del balance hídrico superficial de la zona donde estará ubicada la represa del mismo nombre, para así determinar el volumen de la presa teniendo en cuenta un caudal ecológico y la capacidad hídrica de la zona.

La elaboración de este trabajo se debe a que mi familia y yo somos provenientes de Moquegua y Arequipa, y aportar los conocimientos adquiridos de mi carrera en este estudio significaría un paso hacia mejores condiciones de vida para el lugar de donde provengo.

Finalmente, quisiera agradecer a mi asesora Magíster Marina Farías de Reyes, por orientarme y brindarme todo su apoyo en la ejecución de esta investigación.

Resumen

Esta investigación consiste en la evaluación de las características hidrológicas de la subcuenca del río Paltiture para poder calcular la esorrentía a través del balance hídrico superficial siguiendo la Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur realizada por la Unesco. Para esto, se contó con datos pluviométricos desde el período de 1995 hasta 2010.

Este análisis se realizó con la finalidad de determinar la disponibilidad del recurso hídrico en la subcuenca y así calcular el volumen que podría tener la presa Paltiture.

Para alcanzar los objetivos propuestos se analizaron estadísticamente los datos pluviométricos de las estaciones pertenecientes a la zona de estudio, lo cual permitió estimar el caudal de la zona y la disponibilidad de agua en la subcuenca.

De esta investigación es posible concluir que el volumen del embalse Paltiture se determinó teniendo en cuenta la capacidad hídrica de la subcuenca, el caudal ecológico y la interacción entre ambas, obteniéndose tres posibles resultados: 122, 83 y 141 MMC respectivamente.

El embalse ayudará a disminuir la concentración de elementos contaminantes en el río Tambo por causas litológicas y por ende disminuir los daños ocasionados a la agricultura y la población de la zona.

Índice general

Introducción	13
Capítulo 1	15
Cuenca del río Tambo	15
1.1. Descripción general del área	15
1.2. Climatología.....	17
1.3. Geología.....	19
1.4. Geomorfología	20
1.5. Hidrografía e Hidrología.....	21
1.5.1. Hidrografía.....	21
1.5.2. Hidrología.....	23
1.6. Uso del recurso hídrico de la cuenca	26
1.6.1. Uso agrícola.....	26
1.6.2. Uso poblacional	26
1.6.3. Uso minero	28
1.6.4. Uso Industrial	29
1.6.5. Generación hidroeléctrica.....	30
1.6.6. Uso pecuario	31
1.6.7. Resumen del consumo de agua de la cuenca.....	32
1.7. Proyecto Especial Regional Pasto Grande	33
1.7.1. Introducción.....	33
1.7.2. Finalidad del PERPG.....	33
1.7.3. Etapas del PERPG	33

1.7.4.	Beneficios del PERPG.....	36
1.7.5.	Problemas hídricos del PERPG.....	36
1.8.	Represa Paltiture.....	37
1.9.	Problemática actual: proyecto Tía María.....	38
1.9.1.	Reseña histórica.....	39
1.9.2.	Motivo de la protesta.....	40
1.9.3.	Minas de tajo abierto.....	40
1.9.4.	Estado actual.....	41
Capítulo 2	.....	43
Subcuenca del río Paltiture	.....	43
2.1.	Descripción general del área.....	43
2.1.1.	Cartografía básica.....	43
2.1.2.	Hidrografía.....	47
2.2.	Características geomorfológicas.....	47
2.2.1.	Área y perímetro.....	47
2.2.2.	Forma.....	47
2.2.3.	Relieve.....	53
2.2.4.	Parámetros de la red hidrográfica.....	62
2.2.5.	Resumen de las características geomorfológicas.....	64
Capítulo 3	.....	65
Estudio de los parámetros que intervienen en el balance hídrico superficial	.....	65
3.1.	Período para el cálculo del balance.....	65
3.2.	Ubicación de las estaciones.....	65
3.3.	Precipitación.....	68
3.3.1.	Estimación de datos faltantes.....	68
3.3.2.	Análisis de consistencia de la información pluviométrica.....	70
3.3.3.	Precipitación de la subcuenca.....	71
3.3.4.	Precipitación promedio en la subcuenca.....	73
3.4.	Temperatura.....	75
3.5.	Evaporación.....	79
3.6.	Evapotranspiración.....	79
Capítulo 4	.....	89
Balance hídrico superficial	.....	89
Capítulo 5	.....	91
Disponibilidad del recurso hídrico	.....	91

5.1. Caudal ecológico.....	91
5.1.1. Método de la curva de permanencia	91
5.1.2. Método de Tennant.....	93
5.2. Capacidad hídrica de la zona	94
5.3. Determinación de la capacidad requerida del embalse	94
5.3.1. Escenario 1	94
5.3.2. Escenario 2	96
5.3.3. Escenario 3	97
Conclusiones y recomendaciones	99
6.1. Conclusiones.....	99
6.2. Recomendación.....	100
Bibliografía.....	101

Introducción

El presente trabajo de tesis consiste en realizar el balance hídrico superficial de la subcuenca del río Paltiture para calcular la escorrentía, y con éste analizar la capacidad que podrá tener la presa del mismo nombre ubicada aguas abajo de la subcuenca.

Para la realización de esta investigación fue necesaria información pluviométrica de la cual se tuvieron datos desde el año 1995 hasta 2010.

El presente trabajo se dividió en seis capítulos los cuales tratan diferentes aspectos de la subcuenca.

En el primer capítulo se explica de forma general la cuenca del río Tambo, para poder ubicarnos geográficamente y explicar el problema general de la zona de estudio.

En el capítulo 2, se realiza el análisis de la subcuenca del río Paltiture, descripción general del área y sus características geomorfológicas.

El capítulo 3, es el capítulo más importante del trabajo ya que aquí se efectúa el análisis de consistencia de la información pluviométrica existente haciendo uso del método de curvas dobles acumuladas, con la cual se calcula los parámetros de evaporación y evapotranspiración.

En el capítulo 4, se calcula la escorrentía mensual en la subcuenca del río Paltiture a través del balance hídrico superficial.

En el capítulo 5, se realiza el análisis de la disponibilidad del recurso hídrico con el que se estima hidrológicamente el caudal ecológico requerido para disminuir la contaminación en el río Tambo y la capacidad del embalse a construir.

Y finalmente, se obtienen las conclusiones del estudio realizado y se presentan las recomendaciones pertinentes.

Capítulo 1

Cuenca del río Tambo

1.1. Descripción general del área

La cuenca del río Tambo, es una de las cuencas más agrestes y desconocidas de la zona árida peruana. Comprende las provincias de Sánchez Cerro y Mariscal Nieto en el departamento de Moquegua, las provincias de Arequipa e Islay en el departamento de Arequipa y las provincias de Lampa, Puno y San Román en el departamento de Puno.

Parte de las nacientes de la cuenca se encuentran en el Sur de Puno, la parte alta y media de la cuenca pertenece al departamento de Moquegua, mientras que la parte baja, donde se encuentra el valle del río Tambo, pertenece al departamento de Arequipa (**Gráfico 1**).

Tiene una superficie total de 13 050 km², incluyendo una cuenca húmeda de 8 149 km² ubicada por encima de los 3 900 msnm.

Geográficamente se encuentra comprendida entre los paralelos 15°40' y 17°10' de latitud sur, y entre los meridianos 69°55' y 71°50' de longitud oeste.

Según la “Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú”, documento preparado en el 2008 por el Ministerio de Agricultura y Autoridad Nacional del Agua; a la cuenca del río Tambo le corresponde el código N°1318, pertenece a la unidad hidrográfica N°131 y a la vertiente del Pacífico (N°13).

De acuerdo al documento de demarcación antes citado, la cuenca de Tambo tiene los siguientes límites (**Gráfico 1**):

- Al norte limita con la cuenca Quilca-Vítor-Chili (N°132), la cuenca Coata (N°0176) y la cuenca Illpa (N°0174);
- Al este con la cuenca Ilave (N°016);
- Al sur con la cuenca Locumba (N°1316), la cuenca Ilo-Moquegua (N°13172) y la cuenca Honda (N°13178);
- Y por último al oeste con la intercuenca N°1319.

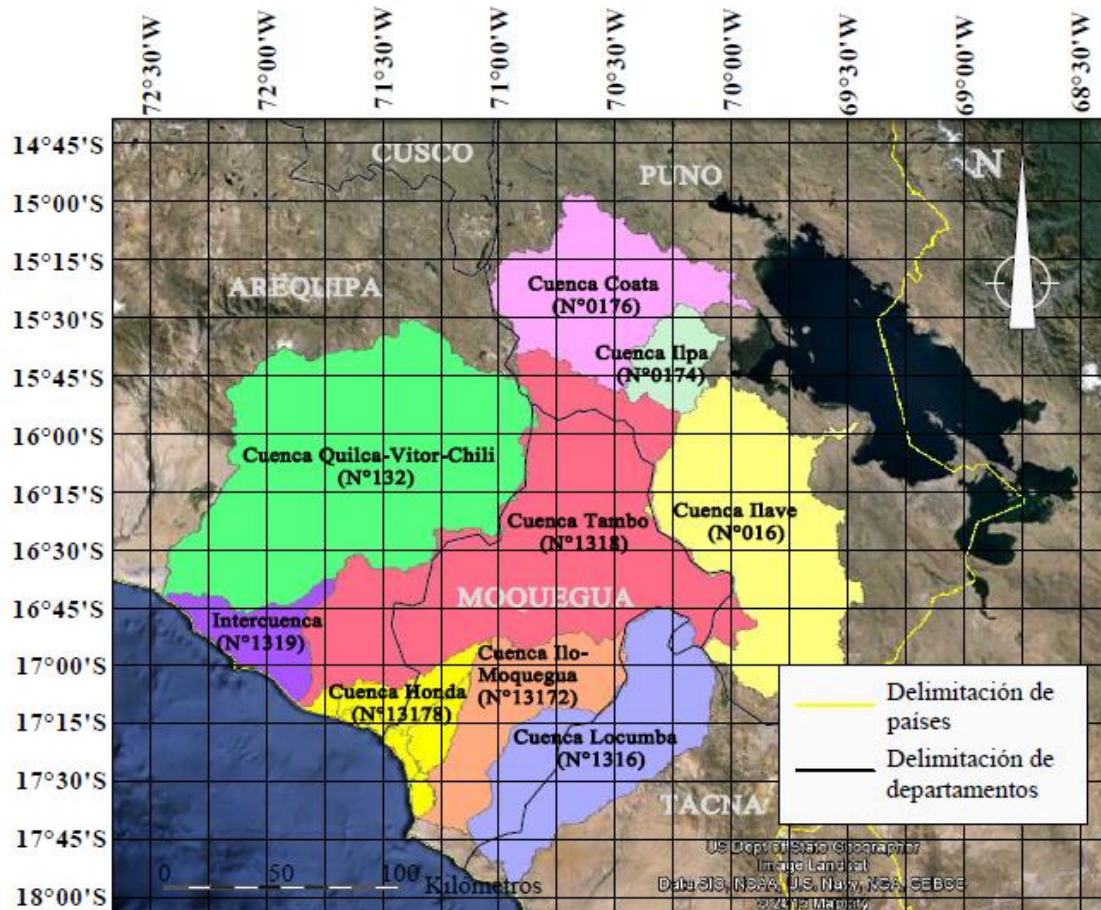


Gráfico 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Tambo.

Fuente: Elaboración propia – Google Earth.

La red hidrográfica de la cuenca, tiene como cauce principal al río Tambo, el cual se desplaza de noreste a suroeste. Tiene una longitud de 289 km, iniciándose a los 4 406 msnm, en la subcuenca del río Paltiture (**Gráfico 2**).

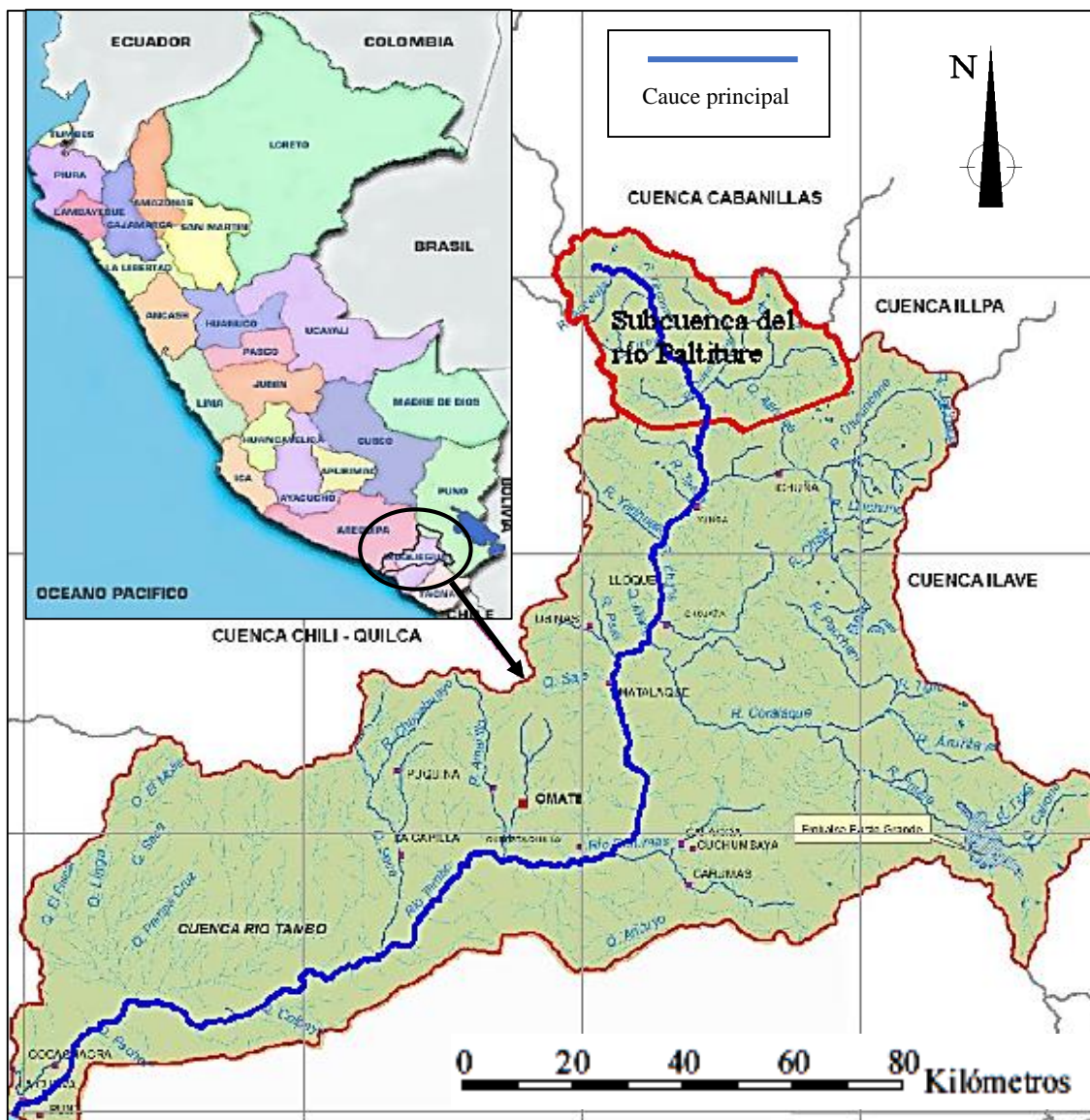


Gráfico 2. Red hidrográfica de la cuenca del río Tambo.

Fuente: MINAG, 2005, Estudio de factibilidad-afianzamiento hídrico del valle del Tambo.

1.2. Climatología

El clima en la cuenca del río Tambo se caracteriza por su aridez en la costa, clima templado en los valles interandinos y clima frío en las altiplanicies andinas.

Desde el punto de vista ecológico, según la clasificación de zonas de la vida de L.R. Holdridge (1967), se han determinado 7 zonas de vida (**Gráfico 3**):

i. Desierto desecado-Subtropical (dd-S)

Esta zona corresponde a la franja comprendida entre el nivel del mar y los 1 800 msnm, la precipitación media anual es nula y la biotemperatura media anual varía entre 12° C y 17° C. El relieve varía de plano a abrupto, los suelos son propios de

desiertos y la vegetación es escasa: En el valle del Tambo se hallan algunos arbustos xerófilos¹ y una amplia variedad de cultivos.

ii. Desierto perárido- Montano Bajo Subtropical (dp-MBS)

Esta zona está comprendida entre los 1 800 y 2 200 msnm, la precipitación media anual es nula y la biotemperatura media anual varía entre 12° C y 17° C. Tiene un relieve topográfico accidentado, pendientes de hasta 70% y la vegetación es escasa: cactáceas, hierbas y arbustos.

iii. Matorral desértico-Montano Bajo Subtropical (md-MBS)

Esta zona está comprendida entre los 2 200 y 3 100 msnm, la precipitación media anual es de 117 mm y la biotemperatura media anual varía entre 12° C y 17° C. Tiene un relieve topográfico que varía entre quebrado y abrupto y la vegetación es escasa: xerófitas achupalla, papa y en las proximidades a los cursos de agua: sauce aliso, chilca, pájaro bobo, mallas, etc.

iv. Matorral desértico- Montano Subtropical (md-MS)

Esta zona está comprendida entre los 3 100 y 3 900 msnm, la precipitación media anual cercana a los 400 mm y la biotemperatura media anual varía entre 6° C y 12° C. Tiene un relieve topográfico empinado, los suelos son profundos, de textura media, calcárea y la vegetación es escasa: festuca, tala, cuaj, cactus (Caracashua o anjojishja).

v. Páramo húmedo-Subalpino Subtropical (ph-SaS)

Esta zona está comprendida entre los 3 900 y 4 500 msnm, la precipitación media anual varía entre los 400 y 500 mm y la biotemperatura media anual varía entre 3° C y 6° C. Tiene un relieve topográfico de laderas inclinadas, los suelos son medianamente profundos, variando de litosoles² a gleysoles³ y orgánicos. La vegetación es escasa: ichu, pajonales (Festuca), quinal gynoxys, cactus, yareta, etc.

vi. Tundra muy húmeda-Alpino Subtropical (tmh-AS)

Esta zona está comprendida entre los 4 500 y 5 000 msnm, la precipitación media anual es superior a 500 mm y la biotemperatura media anual varía entre 1,5° C y 3,0° C. Tiene un relieve topográfico variando de accidentado a colinado y los suelos son tipo andosoles y litosoles. La vegetación es escasa: ichu negro, tola escasa, condorripa y huamanripa.

¹ Término que se aplica en botánica a la vegetación y asociaciones vegetales específicamente adaptadas a la vida en medio seco.

² Suelos no evolucionados que se han formado sobre roca madre dura. También considerados como suelos climáticos. Suelo pedregoso.

³ Suelos con mal drenaje, presentan agua en el perfil en forma permanente o semipermanente. Suelo fangoso.

vii. Nival-Subtropical (N-S)

Esta zona está ubicada sobre los 5 000 msnm, la precipitación media anual es superior a 600 mm y la biotemperatura media anual varía entre 1,5° C y 0° C. Tiene un relieve topográfico abrupto y los suelos son líticos y peñascos. La vegetación está limitada a algas y minúsculos líquenes y crustáceos sobre nieve.

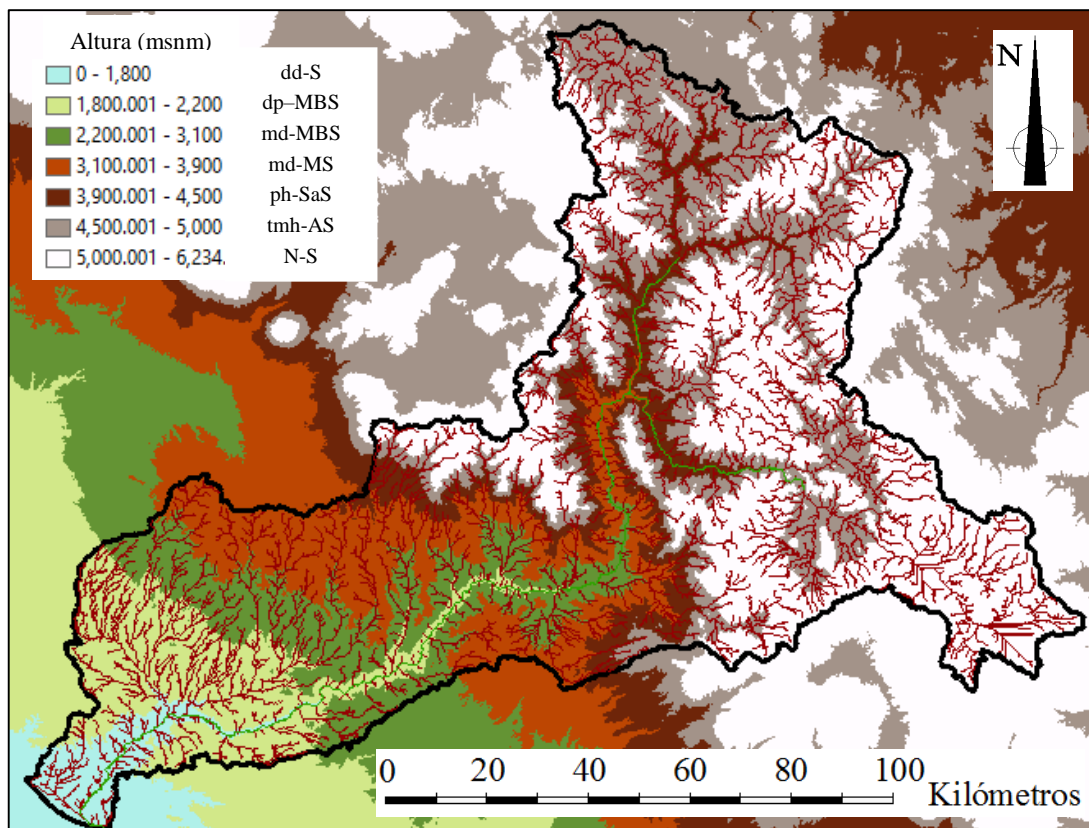


Gráfico 3. Mapa climatológico de la cuenca del río Tambo según la clasificación de zonas de vida de L.R Holdridge.

Fuente: Elaboración propia – ArcGis.

1.3. Geología

Basándome en el “Estudio de abastecimiento de agua - Información complementaria al capítulo 7 del EIA del Proyecto Minero Tía María, 2010”, realizado por la minera Southern Peru Copper Corporation, y el documento de “Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos en la cuenca del río Tambo y Moquegua”, realizado por el ANA; se da una descripción geológica de la cuenca del río Tambo.

Las formaciones geológicas que constituyen la cuenca del río Tambo se extienden desde el precámbrico⁴ hasta el cuaternario reciente. Están representadas por rocas metamórficas, sedimentarias, intrusivas y extrusivas, actuando sobre ellas los procesos geodinámicos internos y externos, modificando las formaciones rocosas de acuerdo al mayor o menor

⁴ Precámbrico: División informal de la escala temporal geológica, es la primera y más larga etapa de la formación de la tierra desde hace 4500 millones de años hasta hace uno 580 millones de años.

comportamiento geomecánico y dando lugar a la formación de estructuras, plegamientos y formación de cuerpos intrusivos o volcánicos de diferente cohesión y resistencia.

El comportamiento geodinámicos de las rocas en la región, se encuentra identificado por el grado de fracturamiento de carácter tectónico o sismo tectónico, por la permeabilidad de las rocas a la acción erosiva de las aguas meteóricas, el viento y los glaciares. Estas perturbaciones de las rocas y el proceso de vulcanismo propio de la región se manifiestan en la presencia de conos volcánicos, cráteres con fumarolas o cenizas volcánicas.

Las rocas que afloran en la región son sedimentarias, metamórficas e ígneas. Las primeras están representadas principalmente por calizas, areniscas, lutitas, conglomerados y en menor proporción, por alternancia de sedimentos finos con materiales volcánicos; los segundos, por cuarcitas, mármoles, gneis u esquistos, micáceos; y las últimas tanto por intrusiones de composición de tipo batolítico e intrusiones menores (stocks, diques, etc.) como por efusiones volcánicas que cubren parcial o totalmente estructuras y rocas más antiguas.

Los depósitos minerales han sido originados por alteración hidrotermal y se les considera tanto de relleno de fisuras como de reemplazamiento metasomático⁵, originados por soluciones hidrotermales. La mineralización está representada por especies minerales de cobre (calcosina, bornita, brochantita, etc.) y de plomo-plata (plata nativa, galena, tetraedrita, etc.).

En el aspecto no metálico, debe anotarse la existencia de un variado conjunto de depósitos, destacándose entre ellos los materiales de ornamentación y los de construcción.

1.4. Geomorfología

Basándome en la información obtenida del “Plan de gestión de la oferta de agua en las cuencas del ámbito del Proyecto Pasto Grande – Volumen II”, realizado por Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento – Instituto Nacional de Desarrollo Proyecto Especial Pasto Grande; se da una descripción geomorfológica de la cuenca del río Tambo.

La cuenca se caracteriza por presentar unidades geomorfológicas bien definidas, con una configuración topográfica muy variada, reconociéndose sectores de suaves pendientes y superficies onduladas, caracterizados por ofrecer cerros escarpados de perfiles angulosos, cortados por quebradas profundas de sección transversal en “V”. Los sectores altos ofrecen planicies de superficies más o menos horizontales las que son interrumpidas por volcanes o cadenas de cerros.

En el **Gráfico 4** se puede apreciar la distinción de las siguientes zonas geomorfológicas:

- a) **Zona Costera:** Es el área ubicada por debajo de los 1200 msnm, constituido por material sedimentario-metamórfico del período jurásico inferior, el cual ha sido afectado por trasgresiones marinas tectonizadas, meteorizadas y erosionadas. Esta zona se caracteriza por su aridez, cultivable solo con riego, como es lo que ocurre en el área del valle bajo Tambo.
- b) **Zona de estribaciones terminales de la cordillera occidental:** Con elevaciones de 1200 a 3000 msnm. Material de origen volcánico, sedimentario, metamórfico e

⁵ Metasomatismo: Proceso geológico que corresponde la sustracción o adición de componentes químicos a una roca mediante fluidos acuosos.

intrusivo, muy meteorizado y erosionado. En su parte más alta se encuentran estepas de lluvia estacional, 11°C a 17°C y quebradas de caudal constante, vital para la agricultura. En la parte baja se encuentra tierra de calidad media, desérticas, 19°C de temperatura media, fundamentalmente son tierras de protección.

- c) **Flanco Andino:** Al este y noreste de la llanura costera se extiende el Flanco Andino, esta zona está formada por rocas volcánicas y macizos intrusivos, muestra una topografía abrupta y disectada.

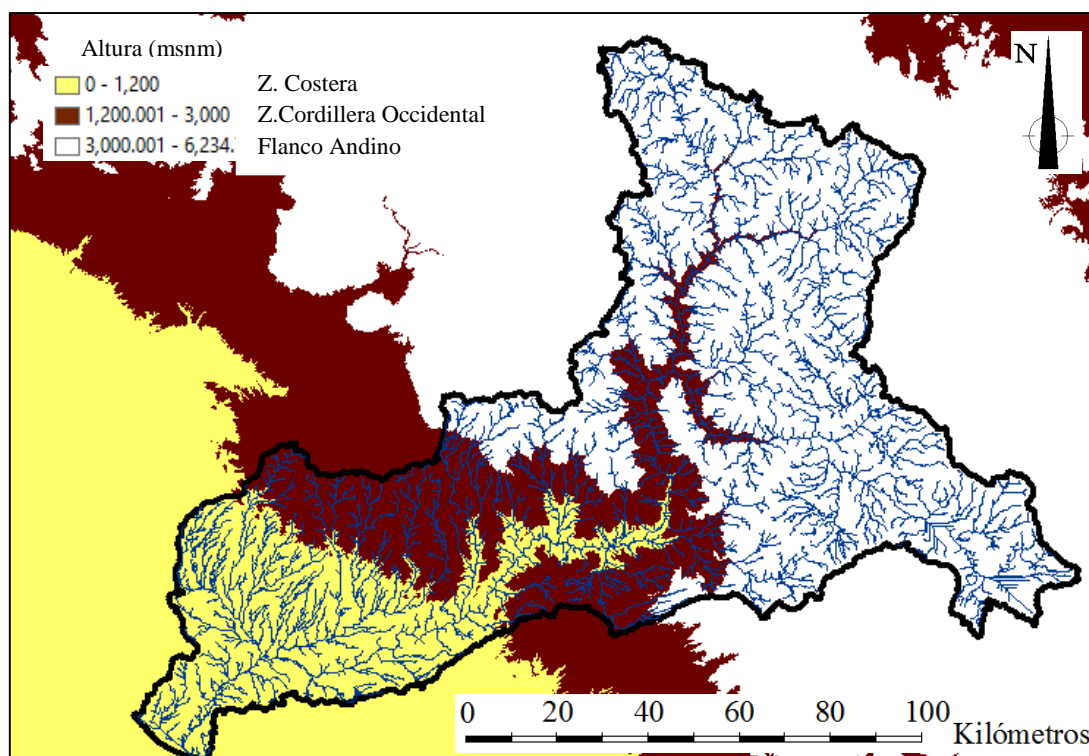


Gráfico 4. Mapa geomorfológico de la cuenca del río Tambo.

Fuente: Elaboración propia – ArcGis.

1.5. Hidrografía e Hidrología

1.5.1. Hidrografía

La cuenca del río Tambo tiene una extensión de 13 050 km², incluyendo una cuenca húmeda de 8 149 km², siendo éste el 62.5% de la cuenca total. Está ubicada por encima de los 3 900 msnm y denominada así por encontrarse encima de los 3 000 msnm, cota fijada como límite superior del área seca y a partir de la cual puede considerarse que la precipitación pluvial es un aporte efectivo al escurrimiento superficial.

Como se mencionó en el apartado 1.1, la cuenca cuenta con una longitud máxima de recorrido, desde su nacimiento hasta su desembocadura, de 289 km.

Su red hidrográfica tiene como principales afluentes a los ríos Paltiture y Vizcachas, siendo este último afluente perteneciente al proyecto Pasto Grande.

El escurrimiento superficial del río Tambo se origina de las precipitaciones que ocurren en su cuenca alta, las cuales se presentan concentradas durante los meses de Diciembre a Abril, como se puede ver en el **Gráfico 5** representado en la estación Chucarapi, y en el **Gráfico 6** representado en la estación La Pascana. El deshielo de los nevados ubicados dentro de la cuenca tiene muy poca incidencia en el escurrimiento ya que son escasos. El caudal de este río disminuye significativamente en el período escaso de lluvias, de Mayo a Noviembre, manteniendo un flujo base menor al promedio anual.

El río Tambo ha venido satisfaciendo con bastante regularidad las necesidades del valle de Tambo, excepto en los períodos de estiaje, de Mayo a Noviembre, en los cuales el caudal del río desciende dificultando la siembra de almácigos de arroz, siendo este tipo de cultivo uno de los más importantes en el valle. Ello se agrava porque a menor caudal, el nivel de concentración de sales y otros elementos contaminantes de las aguas del río Tambo, como arsénico, plomo, cloruros, aluminio y especialmente boro, que se presenta en concentraciones de 4 mg/L (límite para riego es de 1 mg/L), se elevan causando daños a la población (Southern Peru Copper Corporation, 2010).

Esto es sumamente peligroso ya que las plantas absorben boro del suelo y a través del consumo de plantas, éste termina en la cadena alimentaria de las personas. Los efectos del boro en las personas pueden ser de dos tipos, si es consumido en grandes cantidades estos pueden ocasionar infección de estómago, hígado, riñones y cerebro, hasta provocar la muerte; si se consume en pequeñas cantidades tiene lugar la irritación de nariz, garganta y ojos.

Las altas concentraciones de los elementos mencionados tienen origen litológico, ya que en la parte alta de la cuenca no existen hasta la fecha, explotaciones mineras significativas.

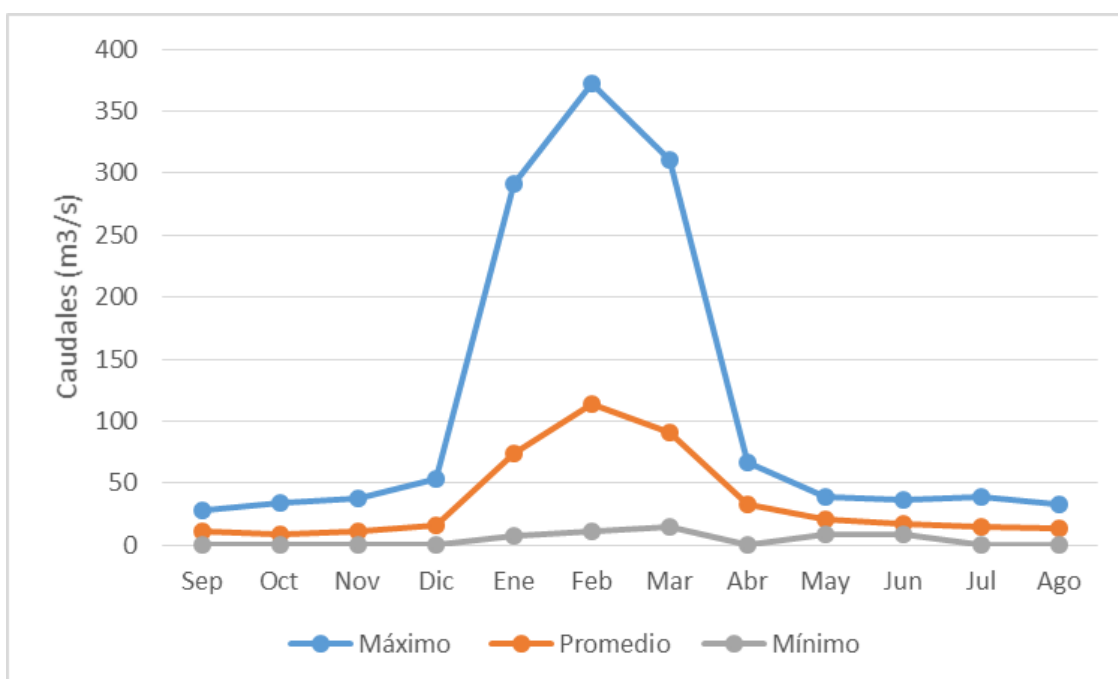


Gráfico 5. Descargas medias mensuales del río Tambo – Estación Chucarapi (m^3/s).
Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015.

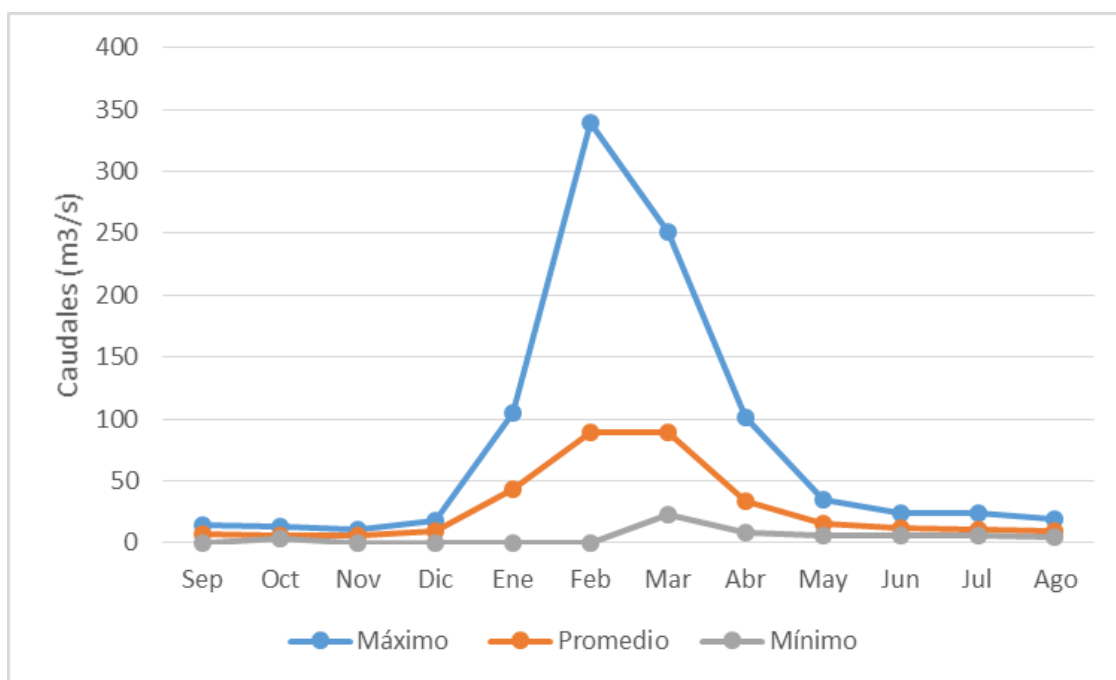


Gráfico 6. Descargas medias mensuales del río Tambo – Estación La Pascana (m^3/s).
Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015.

1.5.2. Hidrología

El agua de acuerdo a la ley de recursos hídricos vigente en el país (LRH, 2009, Art. 1°, p.12): “es un recurso natural, renovable, indispensable para la vida, vulnerable y estratégico para el desarrollo sostenible, el mantenimiento de los sistemas y ciclos naturales que la sustentan, y la seguridad de la Nación”.

El recurso hídrico de la cuenca del río Tambo presenta diferentes realidades debido a la presencia de diferentes zonas geográficas; la costa, desarrollada y densamente poblada, pero seca con infraestructura hidráulica importante, y la sierra, en la que se concentra mayormente la población en nivel de pobreza con abundante recurso hídrico pero con poca infraestructura.

La cuenca del Tambo cuenta con escaso número de fuentes de recursos hídricos pero de tamaño significativo, tales como lagos, lagunas, humedales, ríos y acuíferos.

Estaciones pluviométricas

En la **Tabla 1** se muestran las 16 estaciones pluviométricas que cuenta la cuenca del río Tambo, las que son controladas y registradas por el SENAMHI; y en la **Gráfico 7** se puede apreciar cómo están distribuidas a lo largo de toda la cuenca.

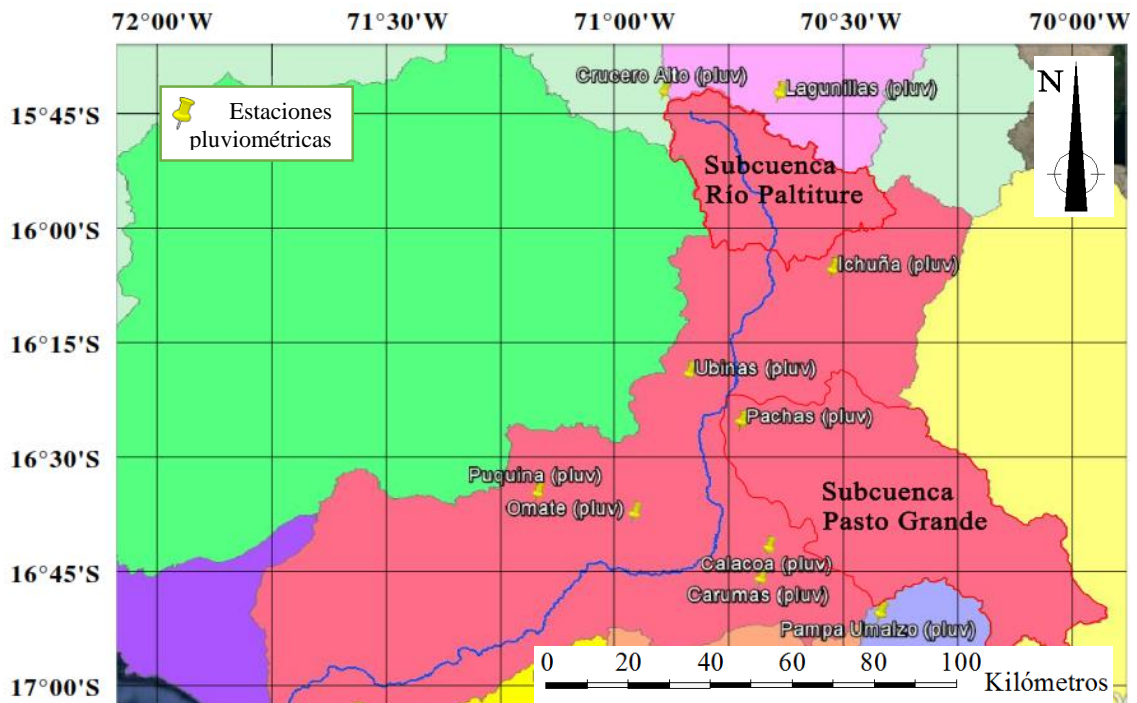
Actualmente se tienen muy pocas estaciones pluviométricas en funcionamiento, siendo estas las siguientes estaciones: Puquina, Pampa Umalzo, Calacoa y Carumas.

A pesar de que desde el siglo pasado se vienen proponiendo proyectos para abastecer de agua la zona sur del Perú, no se ha tomado en consideración la cantidad de estaciones necesarias ni la ubicación de las mismas para poder obtener datos fidedignos para los estudios pertinentes.

Tabla 1. Estaciones pluviométricas en la cuenca del río Tambo.

Estación	Ubicación			Período de registro	Estado
	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)		
Calacoa	16° 44' S	70° 40' O	3260	1995 - 2014	Operativa
Carumas	16° 48' S	70° 41' O	2976	2005 - 2014	Operativa
Coalaque	16° 39' S	71° 01' O	2250	1965 - 1998	Cerrada
Crucero Alto	15° 46' S	70° 55' O	4470	1967 - 2010	Paralizada
Ichuña	16° 08' S	70° 32' O	3792	1976 - 2010	Paralizada
Lagunillas	15° 46' S	70° 39' O	4250	1967 - 2006	Paralizada
Omate	16° 40' S	70° 58' O	2130	1965 - 2004	Cerrada
Pachas	16° 28' S	70° 44' O	3250	1970 - 1984	Cerrada
Pampa Umalzo	16° 52' S	70° 25' O	4609	1995 - 2014	Operativa
Puquina	16° 37' S	71° 10' O	3109	1998 - 2004	Operativa
Ubinas	16° 22' S	70° 51' O	3370	1966 - 2004	Cerrada
Haciendita	No se encontró información				
La Capilla	No se encontró información				
La Haciendita	No se encontró información				
Pampa Blanca	No se encontró información				
Quinistaquillas	No se encontró información				

Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015.

**Gráfico 7.** Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas en la cuenca del río Tambo.

Fuente: Elaboración propia – GoogleEarth y Autocad.

Estaciones hidrométricas

En la **Tabla 2** se muestran las 6 estaciones hidrométricas con que cuenta la cuenca del río Tambo, las que son controladas y registradas por el SENAMHI; y en el **Gráfico 8** se puede apreciar cómo están distribuidas a lo largo de toda la cuenca.

Actualmente se tiene una sola estación hidrométrica en funcionamiento, siendo esta la estación La Pascana.

Tabla 2. Estaciones pluviométricas en la cuenca del río Tambo.

Estación	Ubicación			Período de registro	Estado
	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)		
Chucarapi	17° 05' S	71° 42' O	133	1952 - 1986	Paralizada
Coralaque	16° 39' S	71° 01' O	2250	1965 - 1998	Cerrada
La Pascana	16° 59' S	71° 38' O	281	1995 - 2010	Operativa
Pasto Grande	16° 43' S	70° 14' O	4550	1967 - 1988	Cerrada
Chalzo	No se encontró información				
Tirajones	No se encontró información				

Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015.

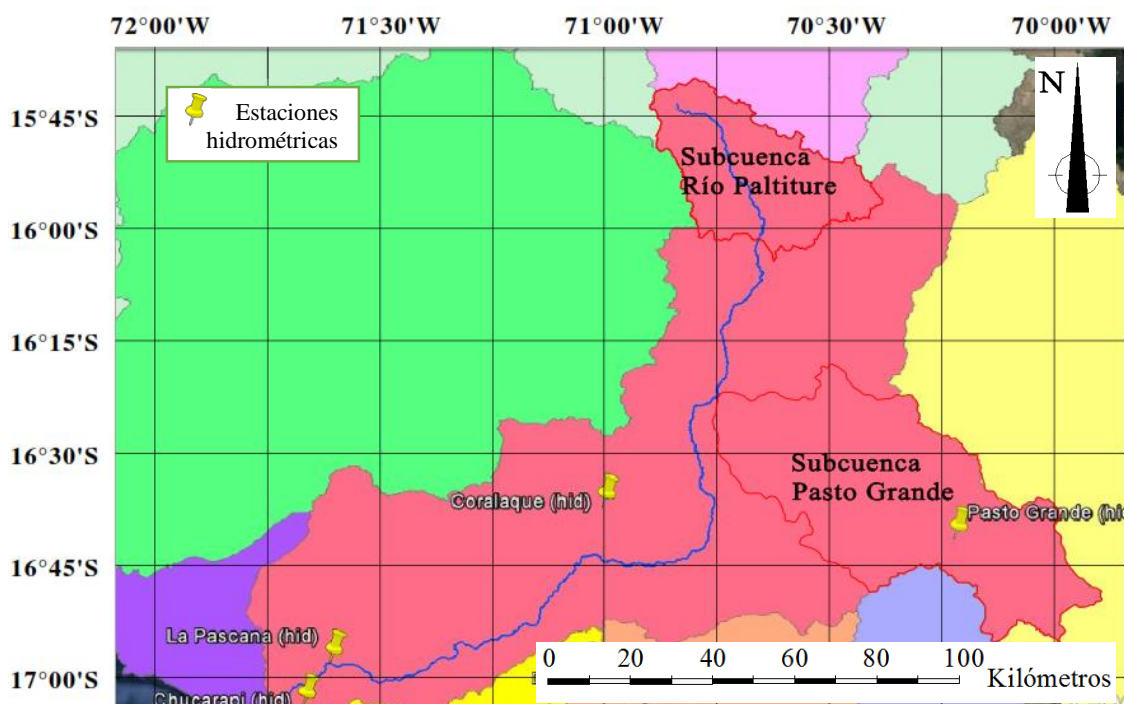


Gráfico 8. Mapa de ubicación de las estaciones hidrométricas en la cuenca del río Tambo.

Fuente: Elaboración propia – GoogleEarth y Autocad.

1.6. Uso del recurso hídrico de la cuenca

1.6.1. Uso agrícola

El sector agrario es el usuario mayor de la cuenca del río Tambo. Según el ATA (2013), las principales áreas agrícolas se encuentran en: el valle bajo de Tambo, donde regularmente se cultiva bajo riego 9 939 ha físicas, y en las partes media y alta de la cuenca existe una superficie cultivada de 13 073 ha, de las cuales aproximadamente 7 509 ha disponen de riego complementario a la lluvia local.

El método de cultivo predominante en el sector costero de la cuenca es el de cultivo transitorio, siendo aproximadamente el 78% de la superficie, cultivada con dicho método. En el sector de la sierra de la cuenca se cultiva bajo riego una zona de aproximadamente 9 800 ha de las cuales, los cultivos transitorios y los pastos cubren casi toda el área de ese sector.

En total se cultivan bajo riego 17 552 ha, que utilizan 408.9 MMC⁶, de los cuales 325.5 MMC son utilizados en la costa y los 83.4 MMC restantes son consumidos en la sierra (**Tabla 3**).

Tabla 3. Uso agrícola en la cuenca del río Tambo.

	Áreas agrícolas	Cultivos bajo riego	Consumo de agua (MMC)
Valle bajo (Costa)	9 939	7 752	325.5
Valle medio y alto (Sierra)	13 073	9 800	83.4
Total	23 012	17 552	408.9

Fuente: ATA, 2013.

1.6.2. Uso poblacional

Este uso es el segundo más importante del área de estudio.

Los centros poblados más importantes que se asientan en la cuenca se concentran en la provincia de Islay, en el departamento de Arequipa y próximos al litoral, donde se encuentra ubicada el 25% de la población total que es de 44 469 habitantes.

La población servida en Mollendo es la más numerosa, con 22 389 habitantes; le sigue en importancia la Punta de Bombón con 6 477 habitantes, los que hacen un consumo de aproximadamente el 34% del uso poblacional del agua de la cuenca.

El volumen utilizado por este concepto asciende a 11.8 MMC anuales. El consumo estimado para la población urbana y rural de la zona templado-cálida es de 380 y 150 l/hab/día, respectivamente, mientras que para la zona de clima frío, corresponde una dotación doméstica del orden de 140 l/hab/día.

La **Tabla 4** muestra la población que hay en el ámbito de la cuenca del río Tambo proyectada al presente año 2015, mientras que la **Tabla 5** muestra en resumen la demanda de agua por la población diferenciando la zona templado-cálida y la zona de clima frío.

⁶ MMC = Millones de metros cúbicos.

Tabla 4. Población en el ámbito de la cuenca del río Tambo – Proyección 2015.

Departamento	Provincia	Distrito	Clima	Zona	Mujer	Hombre	Total
Arequipa (47 071 hab)	Arequipa (2 602 hab)	Polobaya	Frío	Urbana	530	947	1 477
		Yarabamba		Urbana	546	579	1 125
	Islay (44 469 hab)	Mollendo	Templado - cálido	Urbana	10 833	11 556	22 389
		Cocachacra		Rural	4 254	4 730	8 984
		Dean Valdivia		Rural	3 464	3 155	6 619
		Punta de Bombón		Urbana	3 065	3 412	6 477
Moquegua (40 170 hab)	Mariscal Nieto (11 837 hab)	Carumas	Frío	Rural	2 287	3 315	5 602
		Cuchumbaya		Rural	966	1 211	2 177
		San Cristobal		Rural	1 563	2 495	4 058
	Gral. Sánchez Cerro (28 333 hab)	Omate		Urbana	2 138	2 339	4 477
		Chojata		Urbana	1 116	1 457	2 573
		Coalaque		Urbana	488	637	1 125
		Ichuña		Urbana	2 150	2 676	4 826
		La Capilla		Urbana	462	1 751	2 213
		Lloque		Urbana	857	1 118	1 975
		Matalaque		Urbana	543	644	1 187
		Puquina		Urbana	1 144	1 377	2 521
		Quinistaquillas		Urbana	648	762	1 410
		Ubinas		Urbana	1 607	2 042	3 649
		Yunga		Urbana	1 041	1 336	2 377
Puno (21 207 hab)	Puno (8 348 hab)	Mañazo	Rural	72 461	2 610	75 071	
		San Antonio	Rural	1 754	2 045	3 799	
		Tiquillaca	Rural	952	838	1 790	
	Lampa	Rural	3 774	3 711	7 485		
	San Román	Rural	2 901	2 473	5 374		
	TOTAL CUENCA TAMBO					121 544	59 216	180 760

Fuente: INEI, Proyecciones de población, según departamento, provincia y distrito – 2000-2015. Boletín Especial 18, Marzo 2015.

Tabla 5. Demanda de agua para uso poblacional en la cuenca del río Tambo.

		N° de Habitantes	Requerimiento l/hab/día	Demanda (MMC)
Zona templada-cálida	Población urbana	28 866	380	4.0
	Población rural	15 603	150	0.9
Zona clima frío	Población urbana	30 935	140	1.6
	Población rural	105 356	140	5.4
Total Cuenca		180 760		11.8

Fuente: Normalización de infraestructura urbana y propuesta de estándares, -Capítulo III, 2011, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

1.6.3. Uso minero

La tercera demanda importante de agua proviene del sector minería. Las transferencias acreditadas por actividades extractivas a Moquegua, considerando municipalidades, Gobierno Regional y universidad pública, hasta el mes de Diciembre de 2013, alcanzaron los S/. 375.9 millones el cual incluye los intereses generados. Del total de las transferencias, la más importante en los últimos años es el canon minero, siendo el 75% del total. Las regalías representan el 17% del total. (propuestaciudadana.org.pe, 2014).

En Moquegua las principales empresas mineras que operan o están en fase de exploración son: 10 empresas mineras grandes y medianas, 4 pequeñas y 11 artesanales.

Las más importantes son:

- Cuajone de la Southern Perú Copper Corporation (sub cuenca del río Torata), es una de las más importantes minas productora de cobre del país, cuenta con una refinería y fundición en Ilo. Actualmente la minera Southern se abastece con un sistema de desalinización del agua de mar.
- Quellaveco de Anglo American Mining (micro cuenca del río Asana, sub cuenca río Tumilaca), tiene previsto invertir para operar a partir del 2014 produciendo 225 mil TM/año de cobre fino.
- Golde Field y Buenaventura han constituido la empresa minera Canteras del Hallazgo S.A.C, explora en Chucapaca-Cuenca Ichuña, previendo iniciar operaciones el 2015 y producir 341 oz de oro anual ley 1.9 gr/TM y 8.2 gr/TM.

En la **Gráfico 9** se muestra la ubicación de las mineras existentes al sur del Perú.

Si bien la actividad minera no demanda un gran volumen de agua, la autorización de uso es por lo general conflictiva, por haberse generado temor en la población nacional y regional respecto al riesgo de contaminación del agua y el ambiente.

El requerimiento proyectado de Quellaveco asciende a 0.7 m³/s (22.1 MMC), recursos que proponen obtener regulando las descargas de agua superficial de las cuencas de los ríos Titire (18 MMC) y Vizcachas (4 MMC), para ello han estudiado la construcción de sendas presas. La ventaja de esta opción es que las aguas del río Titire es una de las más contaminadas de la cuenca Tambo, por lo que su utilización significaría reducir la carga contaminante especialmente en época de estiaje; y el rendimiento del río Vizcachas es muy superior al volumen requerido por la mina, por lo que los excedentes quedarían a disposición de la cuenca Tambo para su uso en los meses de estiaje.

El requerimiento de agua de la mina Chucapaca⁷, se abastece con agua regulada en un embalse a construir en la cuenca Ichuña, con una capacidad de 17 MMC/año de agua útil, de las cuales la mina utilizaría 5.7 MMC y la diferencia sería descargada en el río Tambo en época de estiaje, contribuyendo a reducir el nivel de contaminación de sus aguas.

⁷ Mina Chucapaca: Ubicada en Moquegua, es uno de los proyectos más importantes de la compañía minera Buenaventura, que se estima una producción de 500.000 oz anuales de oro empezando en el 2017.



Gráfico 9. Mapa de ubicación de las minas al sur del Perú.

Fuente: Página web www.mineriaonline.com.pe.

La demanda total anual de agua a mediano plazo, para uso minero procedente de la cuenca Tambo sería 7.5 MMC (ATA, 2013).

1.6.4. Uso Industrial

El principal usuario de agua para fines industriales en el valle de Tambo es la central azucarera Chucarapi Pampa Blanca S.A con 150 L/s. La empresa Leche Gloria S.A requiere para sus plantas enfriadoras un caudal de 3.6 L/s.

En Moquegua, la SUNAT tiene registradas 558 empresas manufactureras activas: 330 en la provincia de Mariscal Nieto, 218 en la provincia de Ilo y 10 en la provincia de Sánchez Cerro. El 97% son microempresas, 2.5% son pequeñas empresas y solo 1 (0.5%) es una empresa mediana-grande perteneciente al sector industrial de alimentos y bebidas (**Gráfico 10**).

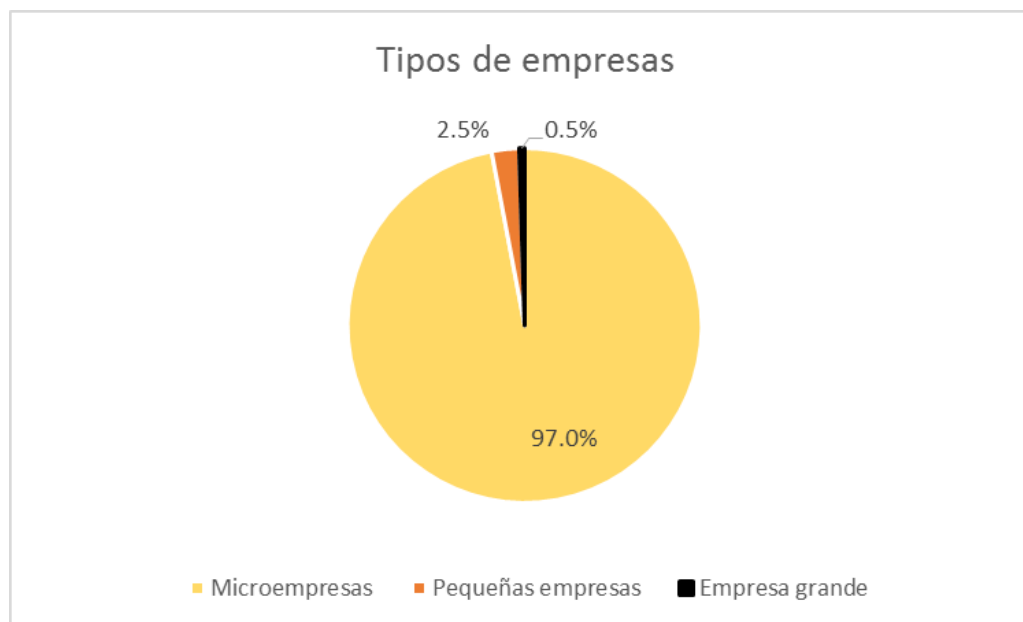


Gráfico 10. Tipos de empresas existentes en el departamento de Moquegua.
Fuente: ATA, 2013.

La demanda de agua más importante de este sector corresponde a la única empresa grande dedicada a la producción de alimentos y bebidas, la central azucarera Chucarapi Pampa Blanca S.A. Esta empresa está formalizando su licencia de uso de agua a partir de una fuente propia, siendo su demanda de 150 l/s.

La demanda total de todas las demás empresas es poco significativa. Ante la falta de información precisa respecto al uso de agua para la actividad industrial, se asume que esta sería igual a un 20% de la dotación doméstica, equivalente a 2.4 MMC (**Tabla 6**).

Tabla 6. Demanda de agua para uso industrial en la cuenca del río Tambo – 2015.

		N° de Habitantes	Requerimiento l/hab/día	Demanda (MMC)
Zona templada-cálida	Población urbana	28 866	76	0.8
	Población rural	15 603	30	0.2
Zona clima frío	Población urbana	30 935	28	0.3
	Población rural	105 356	28	1.1
Azucarera Chucarapi		150 l/s		4.7
Total Cuenca		180 760		7.1

Fuente: ATA, 2013.

1.6.5. Generación hidroeléctrica

Esta demanda aún no ha sido desarrollada en la cuenca Tambo, sin embargo, como parte del proyecto Pasto Grande está prevista la ejecución de 3 importantes proyectos hidroenergéticos: Central hidroeléctricas N1 de 20.9 Mw, central hidroeléctrica N3 de 25.1 Mw y central hidroeléctrica N6 (Chilligua) de 3.8 Mw. Así mismo en la cuenca del

río Tambo como parte de los principales proyectos hidráulicos estudiados, se prevén 2 centrales hidroeléctricas Tambo N°1 de 54 Mw y Tambo N°2 de 9 Mw (ATA, 2013).

Si bien este tipo de usuario no consume el recurso hídrico, de acuerdo a la ley 29338 “Ley de recursos hídricos” y su reglamento, en su planificación se debe prever compatibilizar el régimen de uso para la generación energética con los usos consuntivos de la cuenca, ello suele requerir la construcción de embalses de compensación.

1.6.6. Uso pecuario

Según el MINAG (2005), la población pecuaria en la cuenca está representada por las siguientes especies siguientes, en orden decreciente: auquénidos (59 784), aves de corral (49 449), ovinos (44 086), vacunos (34 448), equinos (11 681), porcinos (8 823), caprinos (3 342) y existen 38 329 animales entre otras especies, las cuales hacen un total de 249 942 unidades (**Gráfico 11**).

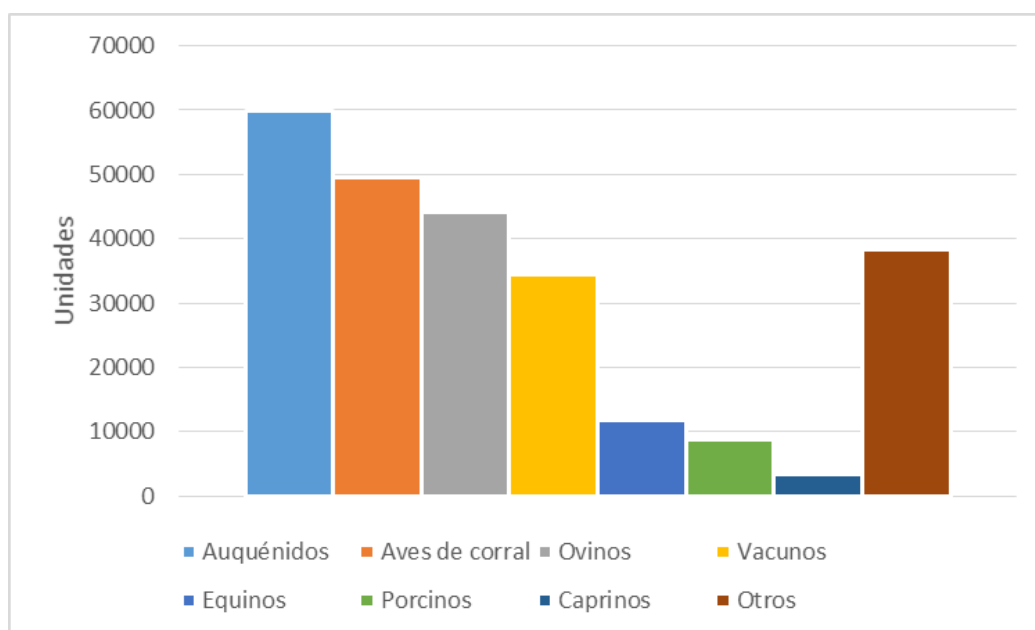


Gráfico 11. Población pecuaria en la cuenca del río Tambo.

Fuente: MINAG, 2005, Estudio de factibilidad-afianzamiento hídrico del valle del Tambo.

En cuanto al consumo del agua, el mayor usuario es el ganado vacuno con 252 mil m³ anuales, le sigue en importancia el ganado auquénido con 90 mil m³ y los equinos con 85 mil m³. El consumo pecuario total alcanza a 537 mil m³, como se puede apreciar en el **Gráfico 12**.

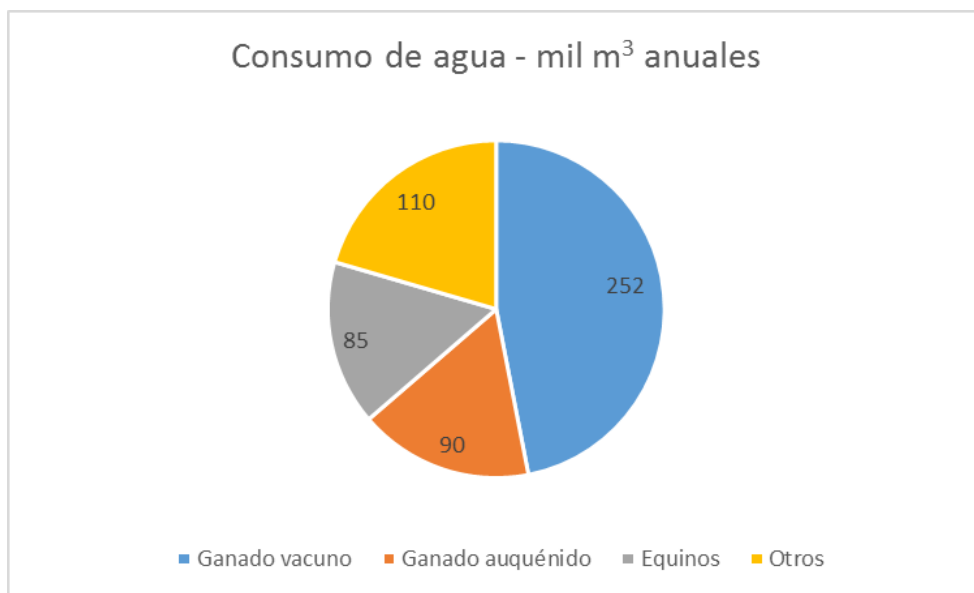


Gráfico 12. Consumo de agua de la población pecuaria.

Fuente: MINAG, 2005, *Estudio de factibilidad-afianzamiento hídrico del valle del Tambo.*

1.6.7. Resumen del consumo de agua de la cuenca

Al realizar la sumatoria de todos los sectores que son abastecidos por el recurso hídrico del río Tambo, llegamos a la conclusión de que se consume actualmente 435.9 MMC de agua (**Tabla 7**).

Debemos tener en cuenta que la presa a construir no se realizará con la finalidad de abastecimiento de agua para la zona del Tambo ya que su demanda es abastecida. El propósito de esta presa es para disminuir la contaminación que existe en el río Tambo por la cantidad de elementos contaminantes por causas litológicas, y que se intensifica durante el período de estiaje ocasionando males en la agricultura y por ende a la población de la zona.

Tabla 7. *Uso del recurso hídrico anual en la cuenca del río Tambo – proyección 2015.*

Sector	Consumo (MMC)
Agrícola	408.9
Poblacional	11.8
Minero	7.5
Industrial	7.1
Generación hidroeléctrica	0.0
Pecuario	0.5
TOTAL:	435.9

Fuente: *Elaboración propia*

1.7. Proyecto Especial Regional Pasto Grande

1.7.1. Introducción

Desde el siglo pasado, el problema principal de la población de la ciudad de Moquegua ha sido el recurso hídrico ya que la escasez del mismo ha marcado el lento desarrollo.

Como resultado de una serie de estudios que demostraban la factibilidad técnico-económica para dar solución a la problemática de falta de agua, se creó el Proyecto Especial Regional Pasto Grande (PERPG) mediante decreto supremo N°024-87-MIPRE el 18 de Noviembre de 1987, como ente ejecutor responsable de la ejecución de los estudios definitivos y las obras consideradas en los estudios de factibilidad.

Mediante ley N°24885, artículo 11, se da fuerza de ley al decreto supremo de creación del Proyecto Especial Pasto Grande.

1.7.2. Finalidad del PERPG

La finalidad del PERPG es la ejecución del desarrollo integral del proyecto hidroenergético “Pasto Grande”, para incrementar la disponibilidad del agua y consecuentemente el área agrícola del departamento de Moquegua. Además, para dar mayor abastecimiento de agua potable, propiciando la producción agropecuaria de desarrollo agroindustrial y el aprovechamiento de los recursos hidroenergéticos.

El proyecto propone la utilización del recurso hídrico del río Vizcachas mediante su almacenamiento en el embalse Pasto Grande, para luego derivarlos hacia el embalse Humalso no sin antes captar mediante bombeo para las aguas del río Chilota y ser trasvasadas a la cuenca del río Moquegua para su aprovechamiento multipropósito.

1.7.3. Etapas del PERPG

Según “La Comisión investigadora encargada de cumplir las conclusiones y recomendaciones a las que arribaron las 5 comisiones investigadores respecto al período del ex presidente Alberto Fujimori Fujimori – Julio 2003”, el PERPG se dividía en las siguientes etapas:

- 1° Etapa
 - Fase 1 (Ejecutada)
 - Embalse Pasto Grande, con capacidad máxima para 185 MMC.
 - Canal Pasto Grande de 39.1 km de longitud y 9.0 – 10.0 m³/s de capacidad.
 - Túnel Jachacuesta de 7 km de longitud y 12 m³/s de capacidad.
 - Canal provisional Jacha Circa de 7 km de longitud y 2 m³/s de capacidad.
 - Canal Humalso de 20.9 km de longitud y 8.0 m³/s de capacidad.
 - Fase 2
 - Bocatoma Otorá y Torata como Estructuras de captación en los ríos Otorá y Torata con capacidad de captación de 7.0 m³/s (Ejecutado).
 - Trasvase Huaracane – Chen chen, canal de 21 km para 7.0 y 5.0 m³/s (Ejecutado).
 - Canal Chen chen – San Antonio de 5.5 km de longitud y 5.0 m³/s de capacidad (Ejecutado).
 - Canal San Antonio – Jaguay de 17 km de longitud y 5.0 m³/s de capacidad (Ejecutado).

- Canal Jaguay – Hospicio – Ilo de 62 km de longitud y capacidad variable entre 5.0 y 3.0 m³/s (con estudio definitivo).

➤ 2° Etapa

- Presa Humalso proyectada para un volumen de almacenamiento de 80 MMC (Estudio definitivo).
- Sistema de bombeo y derivación Chilota – Chincune, conformado por 2 captaciones, dos plantas de bombeo para 1.5 m³/s y canal de conducción de 22.3 km de longitud total (Estudio definitivo).
- Central hidroeléctrica N°1 de 21.0 Mw (Estudio de factibilidad).
- Central hidroeléctrica N°3 de 25.0 Mw (Estudio de factibilidad).
- Central hidroeléctrica N°6 de 3.5 Mw (Estudio definitivo).

Actualmente el proyecto se ha extendido hasta una tercera etapa (Página web del Proyecto Especial Pasto Grande www.pastogrande.gob.pe – 17 de Febrero de 2015):

➤ 3° Etapa

- Reservorios e infraestructura hidráulica para optimizar el uso del recurso hídrico en los valles de la provincia General Sánchez Cerro (En estudio).
- Reservorios y trasvases para la ampliación de la frontera agrícola en la pampa de la Clemesi y Guaneros (En estudio).

En resumen, se presenta un esquema de las etapas que conforman el Proyecto Especial Regional Pasto Grande (**Gráfico 13**).

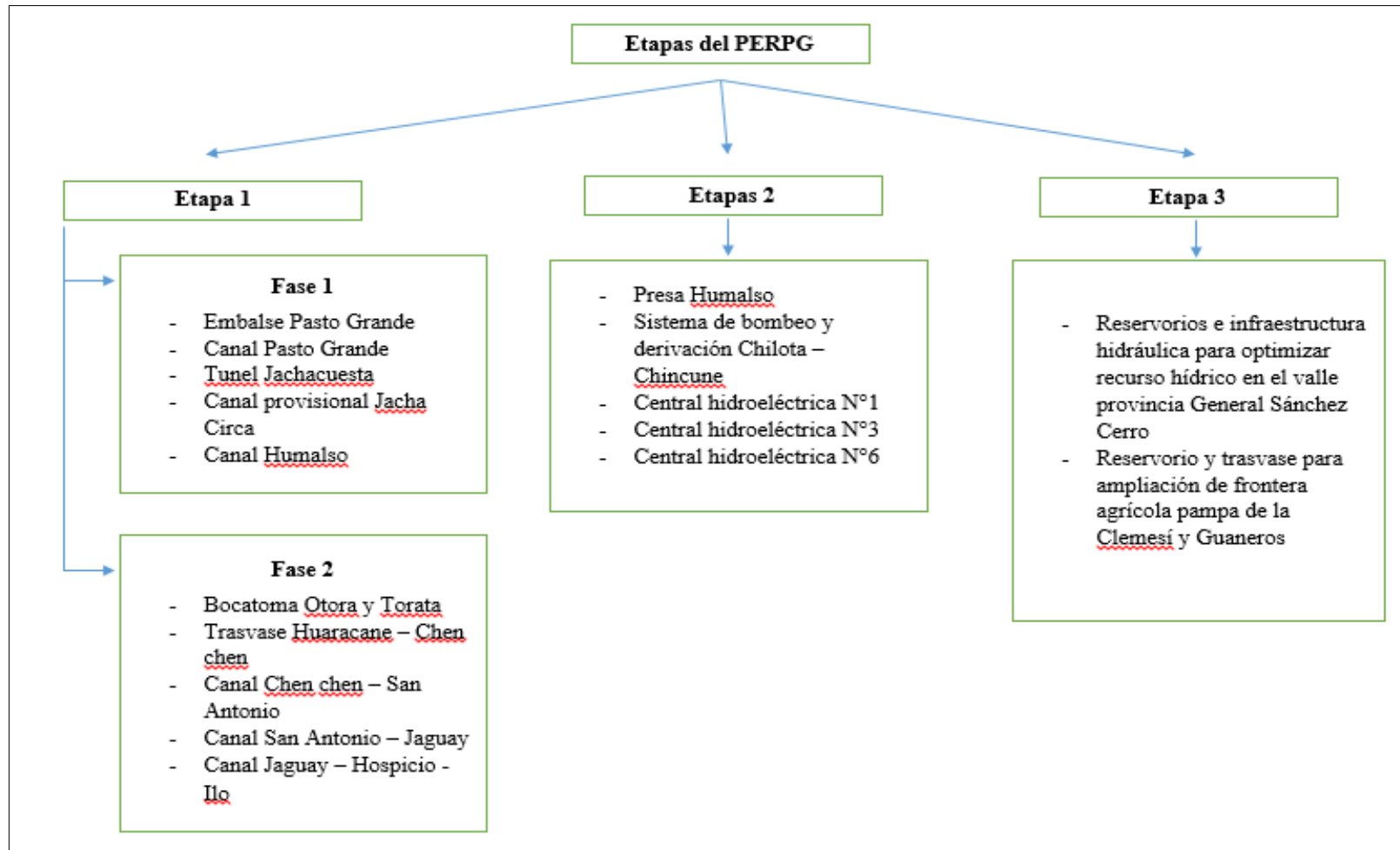


Gráfico 13. Esquema de las etapas del Proyecto Especial Regional Pasto Grande (PERPG).

Fuente: Página web www.pastogrande.gob.pe – 17 de Febrero de 2015.

1.7.4. Beneficios del PERPG

El esquema hidráulico del PERPG, incluye el trasvase de los recursos hídricos superficiales de los ríos Vizcachas, Chilote y Chincune hacia la cuenca del río Moquegua, mediante un conjunto de obras de trasvase, regulación, captación y conducción; recursos que unidos a los recursos de los ríos Tumilaca, Torata, Huaracane y Moquegua se utilizarán con los siguientes beneficios (Página web del Proyecto Especial Pasto Grande www.pastogrande.gob.pe – 17 de Febrero de 2015):

- Mejoramiento del riego de 3000 hectáreas de los valles de Moquegua, Torata e Ilo.

Valle de Moquegua	2224 ha.
Valle de Torata	300 ha.
Valle de Ilo	476 ha.

- Abastecimiento de agua para uso poblacional de la ciudad de Moquegua.
- Ampliación de la frontera agrícola de 2759 hectáreas distribuidos en:

Pampa Estuquiña	60 ha.
Pampa San Antonio	828 ha.
Pampa Jaguay Rinconada	1800 ha.

- Generación hidroenergética.

1.7.5. Problemas hídricos del PERPG

Han transcurrido más de 20 años desde que se inició la ejecución de las obras del PERPG, y se pudieron alcanzar algunos de los objetivos planteados:

- Abastecer de agua a las provincias de Moquegua, Samegua e Ilo;
- Mejorar el riego de los valles y
- Expandir la frontera agrícola bajo riego en las pampas de Estuquiña, San Antonio y Jaguay Rinconada.

No todos los objetivos del proyecto se cumplieron, debido a que existe una insuficiencia de agua en el sistema hidráulico de Pasto Grande, ya que el embalse se construyó para almacenar 189 MMC; sin embargo, actualmente el embalse almacena 73 MMC.

Una de las razones por la cual el embalse Pasto Grande no almacena el total de su capacidad, es por la elevada tasa de pérdida por evaporación. Aproximadamente 50 MMC en un año hidrológicamente húmedo, debido a la gran amplitud de su espejo de agua como se muestra en la **Gráfico 14**.

En el área de riego Pasto Grande está pendiente el mejoramiento de la eficiencia de riego en el Valle de Moquegua, a fin de reducir la demanda de agua, mejoramiento que no solo implica la promoción del uso de técnicas de riego presurizado sino también de mejorar la eficiencia de conducción, distribución y aplicación del agua de riego por gravedad.

Al mismo tiempo los usuarios del valle del Tambo siguen exigiendo agua del embalse Pasto Grande para sus almacigos de arroz durante los meses de estiaje, trayendo consigo una serie de problemas de índole social, entre la población de Tambo y la población de Moquegua, debido a la renuencia de estos últimos de seguir cediendo parte del agua almacenada en el reservorio Pasto Grande.

Antes que entrara en funcionamiento el sistema Pasto Grande, se previó la problemática antes descrita, razón por la cual el Plan Director del proyecto Pasto Grande, actualizado en 1994, propone la necesidad de ejecutar obras de regulación para compensar al valle del Tambo, por la reducción del caudal debido a la puesta en marcha de la primera etapa del Proyecto Pasto Grande, reducción que se incrementaría cuando se ejecute la Segunda etapa.

El ex Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), a través de la ex Intendencia de Recursos Hídricos, en agosto del 2005 concluyó el estudio de factibilidad para el Afianzamiento Hídrico del valle del Tambo, estableciendo que este valle debería ser compensado por las derivaciones de la Primera etapa de Pasto grande, con 8,2 MMC/año de agua regulada para ser utilizada en los meses de estiaje y considerando las derivaciones previstas como segunda etapa de Pasto Grande. Esta regulación a favor del valle del Tambo debería ser de 15 MMC anuales. Con este fin se proyectó la construcción de la represa Paltiture.

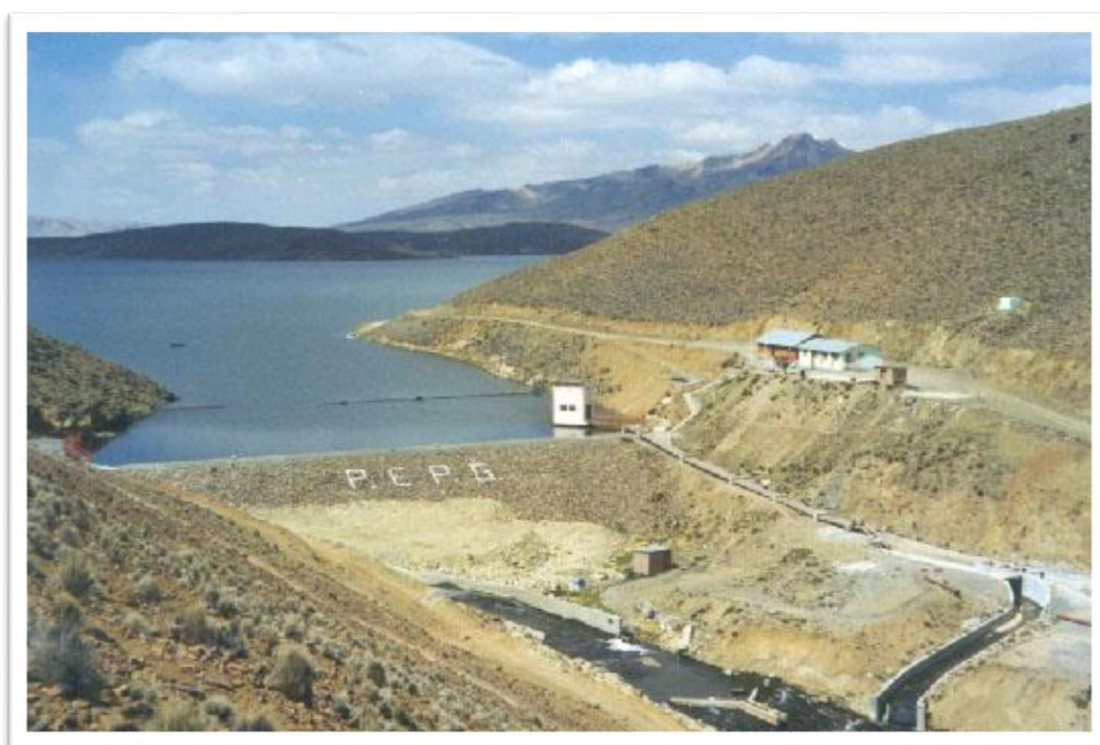


Gráfico 14. Vista de la presa Pasto Grande desde aguas abajo hacia aguas arriba, mostrándose el espejo de agua del embalse.

Fuente: Artículo de la revista Caretas "La diablada del agua", 27 de Noviembre de 2003.

1.8. Represa Paltiture

La represa Paltiture, es un proyecto que inicialmente fue elaborado por el gobierno regional de Moquegua, pero fue transferido al Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) por tratarse de una obra que beneficia a dos regiones vecinas.

Estará ubicada a 8.4 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Tincopalca y Quemillone, en el distrito de Ichuña, provincia de Sánchez Cerro, departamento de Moquegua.

El proyecto inicial llamado Proyecto Tolapalca, gestado en 1999, consideraba la regulación de aguas del río Paltiture mediante una presa de tierra ubicada a unos 200 metros aguas abajo de la confluencia del río Tincopalca y Quemillone, a una altitud de 3822 msnm, con una capacidad útil de 70 MMC.

En el 2010 la minera Southern Peru Copper Corporation, por el proyecto Tía María, se comprometió a financiar la construcción de la presa de Tolapalca, con lo cual el proyecto y diseño de la presa fue realizado a nivel definitivo, pero se descartó por el rechazo de la población de Tolapalca por temor a que ocasione inundaciones.

En el 2005 se creó el proyecto de la represa Paltiture donde cambiaron la ubicación de la represa a su actual ubicación, y se creó el Proyecto de ley – Ley que declara de interés y necesidad pública la ejecución de cuatro represas en las regiones Arequipa, Ayacucho y Moquegua – Agosto de 2011. La ley menciona que la represa tendrá una capacidad de 15 MMC, y selecciona a la empresa que se encargará del expediente técnico y construcción de la obra a Consorcio Hídrico Moquegua e integrado por las empresas Montes Hermanos y JC contratistas.

Los objetivos de esta represa son:

- Resolver la demanda de agua en tiempos de estiaje del valle del Tambo, lo que además permitirá ampliar la frontera agrícola en mil hectáreas en el distrito de Quinistaquilla y en el futuro con otros distritos interandinos de la provincia moqueguana de Sánchez Cerro.
- Dar viabilidad a los proyectos mineros que están en la zona y que exigen la garantía de contar con agua para el agro.

Según la agencia peruana de noticias Andina (14 de Enero de 2015), se había informado que el Sr. Juan Manuel Benites, titular del Minagri, había declarado que los técnicos del Minagri estaban terminando con el estudio de factibilidad para poder proceder a la elaboración del expediente técnico de dicha obra. Aunque se había afirmado que la obra empezaría en la segunda mitad del año 2015, en la actualidad, a fines de marzo 2016, no se ha iniciado ni se ha publicado una nueva fecha.

1.9. Problemática actual: proyecto Tía María

El proyecto Tía María es un proyecto de la empresa minera Souther Perú Copper Corporation (SPCC), que consta de la explotación y procesamiento de cobre en el distrito de Cocachacra, provincia de Islay departamento de Arequipa, que producirá aproximadamente 10 000 toneladas de mineral por día y tendrá una vida útil de 18 años. Esto representa una inversión estimada de \$ 1 300 millones.

En el **Gráfico 15** se muestra la ubicación del proyecto Tía María.

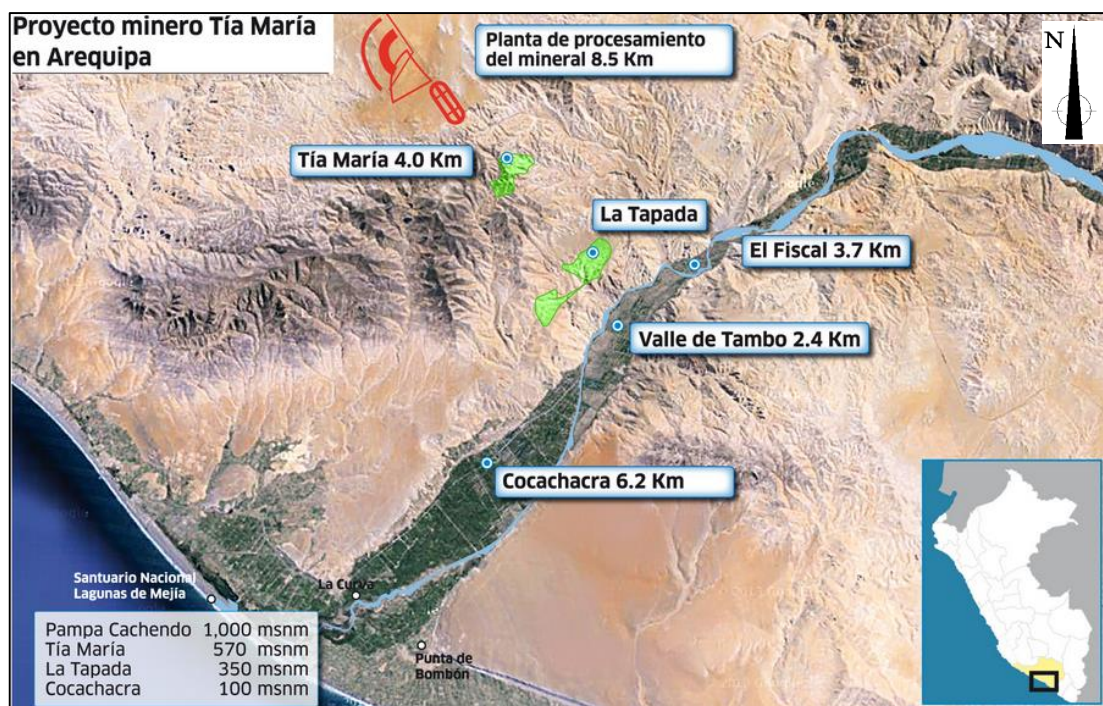


Gráfico 15. Ubicación del proyecto minero Tía María.

Fuente: <http://www.miningpress.com.ar/>.

Se estima que en la etapa de construcción se generarán 3 500 puestos de trabajo directo y durante la etapa de operación, 764 empleos directos.

Este proyecto data desde el año 1994, cuando la empresa Texk Cominco inicio sus operaciones en Cocachacra y en el 2009 la empresa minera SPCC presentó el estudio de impacto ambiental (EIA) del proyecto minero Tía María.

En el 2011, los opositores anti mineros iniciaron un paro indefinido en el valle de Tambo, perteneciente a la provincia de Islay, contra el proyecto Tía María. Tras violentas protestas, el 08 de Abril de 2011 mediante Resolución Directoral N°105-2011-MEM-AAM, el gobierno declaró inadmisibles el Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Tía María y dispuso el retiro de maquinarias, equipos e instalaciones en la zona (Página web del Ministerio de Energía y Minas www.minem.gob.pe, 25 de Mayo de 2015).

1.9.1. Reseña histórica

Cuando la empresa minera SPCC empezó sus operaciones en los años cincuenta, contaminó severamente la costa, producto de sus procesos de fundición y la creación de relaves.

Con el objetivo de minimizar estos daños, a principios de los años noventa, Southern empezó de manera unilateral a implementar nuevas tecnologías e invirtió más de \$500 millones en modernizar la planta de fundición de Ilo.

Pese a estos esfuerzos, todavía muchas personas tienen vivos recuerdos de la contaminación causada en sus inicios, lo cual ha afectado la imagen y credibilidad de la empresa (El Comercio, 12 de Abril de 2015).

1.9.2. Motivo de la protesta

La población de Islay tiene el temor que con el proyecto Tía María se contamine el aire con emanaciones de cianuro, óxido nítrico, dióxido de azufre entre otros gases, generando el “humo negro”; además de producir desequilibrios hídricos al elevarse el nivel de sedimento de los ríos producto de los residuos sólidos muy finos que pululan en el ambiente, y al mismo tiempo afecten las aguas subterráneas o freáticas con las lluvias que caen sobre los reactivos, aceites y sales minerales residuales de los procesos de tratamiento.

La respuesta social negativa es principalmente por los productores agrarios de Cocachacra y sus familias, ya que la contaminación del aire y del recurso hídrico, afectarían directamente a su principal actividad económica al no poder usar el agua subterránea ni el agua del río del Tambo.

La agricultura en el valle del tambo sustenta la alimentación no solo del distrito de Cocachacra sino a todo el departamento de Arequipa con la producción de azúcar, hortalizas, papa, alfalfa, entre otros productos agrarios.

Aunque la empresa Southern ha anunciado que va a usar el agua del mar para el proyecto Tía María, el temor sigue latente por la contaminación del aire que de todas maneras se ocasionaría por la extracción de miles de toneladas de cobre al año.

Como se ha explicado a lo largo del capítulo, la cuenca del río Tambo sufre de un evidente desequilibrio hídrico que no le permite mantener con solvencia la producción en el valle del Tambo, debido a que el agua que proviene de la ésta cuenca, cuya naciente se da en la subcuenca del río Paltiture, es escasa, especialmente en las épocas de estiaje.

Esta dificultad hídrica que procede de los irregulares volúmenes de agua superficial que viene de las alturas, es manejada por los agricultores mediante el uso de las aguas subterráneas. De esta manera se ha logrado un precario equilibrio hídrico a fin de atender sus necesidades de agua potable y de producción agrícola (El Comercio, 12 de Abril de 2015).

1.9.3. Minas de tajo abierto

La empresa minera SPCC es una mina de tajo abierto. Este tipo de minas son de superficie que adoptan la forma de grandes fosas en terraza, cada vez más profundas y anchas. La minería a tajo abierto supone dinamitar la roca superficial y llevarla a pequeñas dimensiones, por lo que montañas enteras son convertidas en rocas. Su extracción empieza con la perforación y voladura de la roca.

Diversos informes científicos determinaron que durante la fase de explotación, los principales impactos ambientales causados son:

- Modificación de la superficie terrestre del área de explotación: devasta la estructura del suelo produciendo cambios severos en la morfología del terreno.
- Eliminación del suelo y resecamiento en la zona circundante.
- Disminución del rendimiento agrícola y agropecuario.
- El impacto sobre la flora es de gran magnitud, implica la eliminación de la vegetación y los bosques en el área de operaciones.
- Destrucción y modificación de la flora en el área circunvecina.
- Provoca presión sobre los bosques existentes en áreas vecinas que pueden llegar a destruirse.

El entorno queda afectado porque se transforma radicalmente, pierde su atracción escénica o paisajística, sumada a la contaminación sonora por el ruido producido por las distintas operaciones: trituración y molienda, generación de energía, transporte, carga y descarga de materiales, etc. (El Comercio, 12 de Abril de 2015).

1.9.4. Estado actual

Los técnicos del ministerio de Energía y Minas, subrayaron que el proyecto Tía María no utilizará agua dulce, sino agua de mar desalinizada en su etapa de explotación, con lo que se descarta la contaminación, ya sea del río Tambo como de las aguas subterráneas.

Además la minera se ha comprometido a costear cualquier impacto negativo que se pueda presentar durante la operación del proyecto Tía María, pero la población de Islay no les cree, por lo que seguirán las protestas anti mineras hasta que el gobierno rechace el proyecto (RPP Noticias, 25 de Mayo de 2015).

Capítulo 2

Subcuenca del río Paltiture

2.1. Descripción general del área

La subcuenca del río Paltiture, perteneciente a la cuenca del río Tambo, se ubica en la parte norte de dicha cuenca. Comprende las provincias de Lampa, San Román y Puno en el departamento de Puno, y la provincia de General Sánchez Cerro del departamento de Moquegua.

Geográficamente se encuentra comprendida entre los paralelos 15°42' y 16°02' de latitud sur, y entre los meridianos 70°56' y 70°25' longitud oeste (**Gráfico 16**).

2.1.1. Cartografía básica

La delimitación base de la subcuenca del río Paltiture se ha tomado de la “Demarcación y Delimitación de las Autoridades Administrativas del Agua”, documento preparado en el año 2009, por la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, de la Autoridad Nacional del Agua en Perú.

Para una delimitación más precisa se han utilizado las hojas de la carta nacional del Perú preparado y publicada por la Defensa Mapping Agency Hydrographic/ Topographic Center, Bethesda, MD (**Tabla 8**). Las cartas nacionales contienen información recopilada hasta el año 1989 en coordenadas PSAD 56 y están a escala de 1:100 000.

Tabla 8. Cartografía utilizada para el trazado de la subcuenca del río Paltiture.

Carta Nacional	Edición	Serie	Hoja
Santa Lucía	1-DMA	J632	2739
Lloque	1-DMA	J632	2738
Pichacani	1-DMA	J632	2838
Puno	1-DMA	J632	2839

Fuente: Página web www.geopsperu.com

2.1.2. Hidrografía

La red hidrográfica de la subcuenca está conformada por los siguientes ríos: Acceuta, Vergara, Toroya, Pundición, Quemillone, Tocramayo, Collpa Mayo, Tincopalca y Palturure. Tiene como cauce principal el río Tincopalca, y al confluir con el río Quemillone, nace el río Paltiture. Este, a su vez, al confluir con el río Ichuña, nace el río Tambo (**Gráfico 17**).

La red de drenaje comienza a una altura de 4 406 msnm y termina a una 3 744 msnm, con una longitud de 50.4 km.

2.2. Características geomorfológicas

Basándome en la información recopilada de las siguiente fuentes: Principios y fundamentos de la hidrología superficial, Breña Puyol y Jacobo Villa, 2006; y de la revista HidroRed 2004; explico las siguientes características geomorfológicas de la subcuenca del río Paltiture.

2.2.1. Área y perímetro

El área de la cuenca es probablemente la característica geomorfológica más importante para el diseño. Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural, en otras palabras, es el área plana comprendido dentro del límite o divisoria de aguas.

El área de la subcuenca es el elemento básico para el cálculo de las otras características físicas de la cuenca y está expresado en km².

El perímetro de la cuenca se refiere al borde de la forma de la cuenca proyectada en un plano horizontal, es de forma muy irregular y se obtiene después de delimitar la subcuenca.

El área de la subcuenca es 1 197.1 km² y su perímetro es 204.7 km, determinado con los programas ArcGis y Autocad.

2.2.2. Forma

La forma superficial de una cuenca hidrográfica es importante debido a que influye sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación dada. Está definido como el tiempo necesario para que toda la cuenca contribuya al flujo a partir del inicio de la lluvia, es decir, el tiempo que tarda el agua desde los límites de la cuenca, para llegar a la salida de la misma.

Así, en una cuenca de forma alargada, el agua discurre en general por un solo cauce principal, mientras que en una cuenca con forma ovalada, los escurrimientos recorren cauces secundarios hasta llegar a uno principal por lo que la duración del escurrimiento es superior.

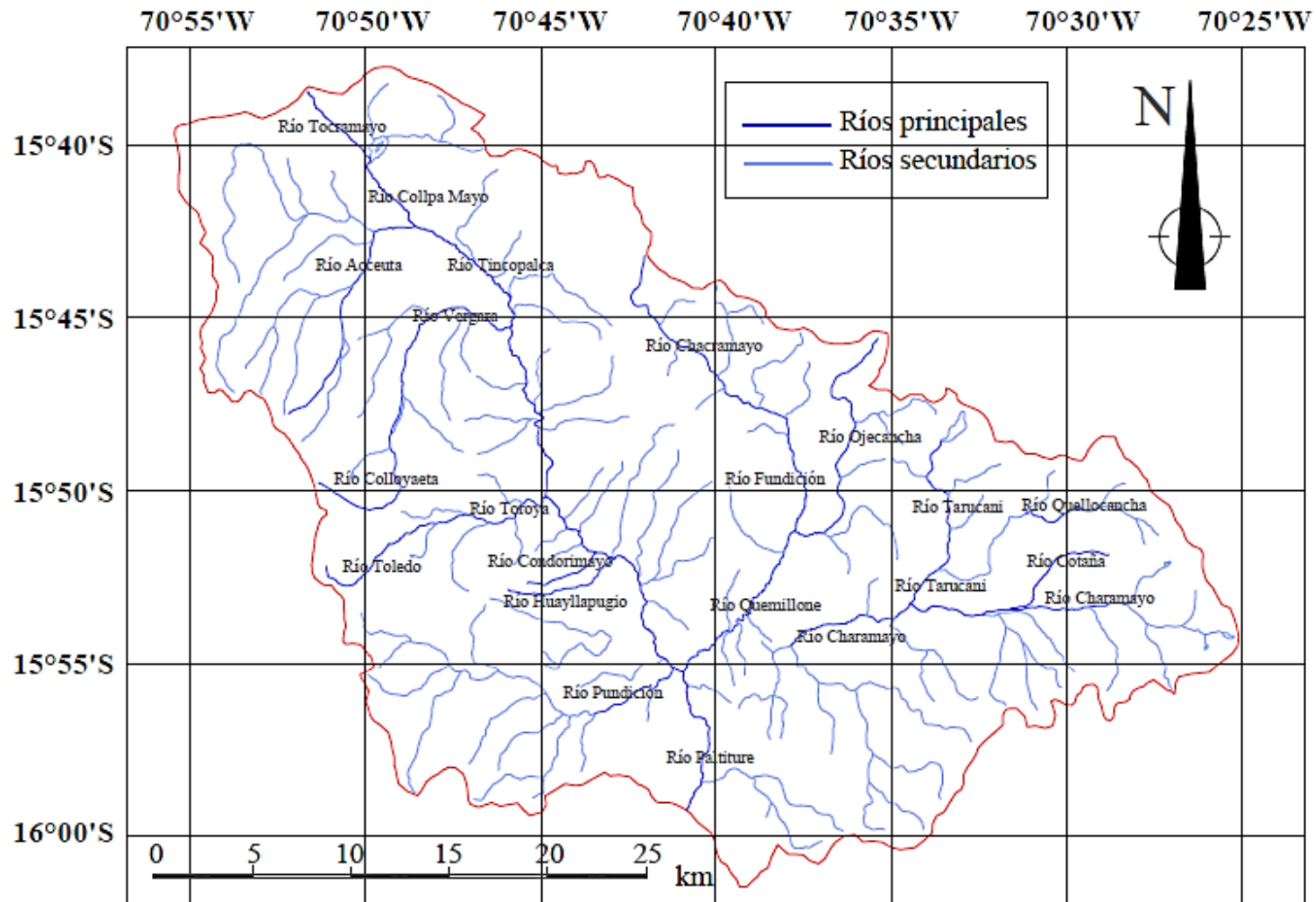


Gráfico 17. Hidrografía de la Subcuenca del río Paltiture.

Fuente: Elaboración propia.

Existen varios índices utilizados para determinar la forma de las cuencas, buscando relacionarlas con formas geométricas conocidas. Por ejemplo, el coeficiente de compacidad que es comparado con un círculo y, el ancho promedio y el factor de forma que son comparados con un rectángulo.

2.2.2.1. Ancho promedio (A_p)

Es la relación entre el área de la cuenca colectora (A) y su longitud de cauce principal (L), se obtiene con la siguiente expresión:

$$A_p = \frac{A}{L} \qquad A_p = \frac{1\,197.1}{50.4} = 23.8 \text{ km}$$

Donde:

A_p = Ancho promedio de la cuenca en km.

A = Área de la cuenca en km^2 .

L = Longitud mayor del río en km.

El ancho promedio de la subcuenca es 23.8 km.

2.2.2.2. Factor de forma

El factor de forma constituye otro índice indicativo de la mayor o menor tendencia de crecientes en una cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo está menos sujeta a inundaciones que otra del mismo tamaño pero con mayor factor de forma. Esto se debe al hecho de que en una cuenca estrecha y larga, con factor de forma bajo, tiene menos posibilidad de ocurrencia de lluvias intensas cubriendo simultáneamente toda su extensión; además la contribución de los tributarios alcanza el curso de agua principal en varios puntos a lo largo del mismo, alejándose, por lo tanto, de la condición ideal de la cuenca circular donde la concentración de todo el flujo de la cuenca se da en un solo punto.

El factor de forma (K_f) es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca. La longitud axial de la cuenca (L) se mide siguiendo el curso del agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante en la cuenca. Tiene la siguiente expresión:

$$K_f = \frac{A}{L^2} \qquad K_f = \frac{1\,197.1}{50.4^2} = 0.47$$

Donde:

K_f = factor de forma.

A = área de la cuenca en km^2 .

L = Longitud de máx. Recorrido de la cuenca en km.

El factor de forma de la subcuenca es 0.47. Esto quiere decir que la subcuenca tiene pocas probabilidades de inundación ante la ocurrencia de una tormenta.

2.2.2.3. Coeficiente de compacidad

Conocida también como el índice de Gravelius (K_c), es un parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que el de la cuenca. Este parámetro, al igual que el anterior, describe la geometría de la cuenca y está

estrechamente relacionado con el tiempo de concentración del sistema hidrológico. En la medida que el índice se acerque más a la unidad, la forma tiende a ser más redondeada y con mayor peligro de que se produzcan crecidas máximas.

$$K_c = \frac{P}{2\pi R} = 0.2821 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad Kc = 0.2821 * \frac{204.7}{\sqrt{1197.1}} = 1.67$$

Donde:

Kc=coeficiente de compacidad.

P=perímetro de la cuenca en km.

A= área de la cuenca km².

El coeficiente de compacidad de la subcuenca es 1.67. Este valor se encuentra alejado de la unidad, lo que significa que la subcuenca tiene una forma alargada y por ende una escorrentía eficiente. Por lo tanto, la subcuenca tiene poca probabilidad de inundarse.

2.2.2.4.Rectángulo equivalente

Es la representación geométrica de la cuenca en forma rectangular, manteniendo el área (A), perímetro (P) y el coeficiente de compacidad. Los lados del rectángulo se obtienen con la siguiente expresión (**Farías, 2015**):

$$Le, le = \frac{P \pm \sqrt{P^2 - 16A}}{4}$$

$$Le = \frac{204.7 + \sqrt{204.7^2 - 16 * 1197.1}}{4} = 88.88 \text{ km}$$

$$le = \frac{204.7 - \sqrt{204.7^2 - 16 * 1197.1}}{4} = 13.47 \text{ km}$$

El rectángulo equivalente de la subcuenca es: Largo del rectángulo (Le) = 88.88 km y ancho del rectángulo (le) = 13.47 km.

En el **Gráfico 18** se muestra una representación del rectángulo equivalente de la subcuenca del río Paltiture.

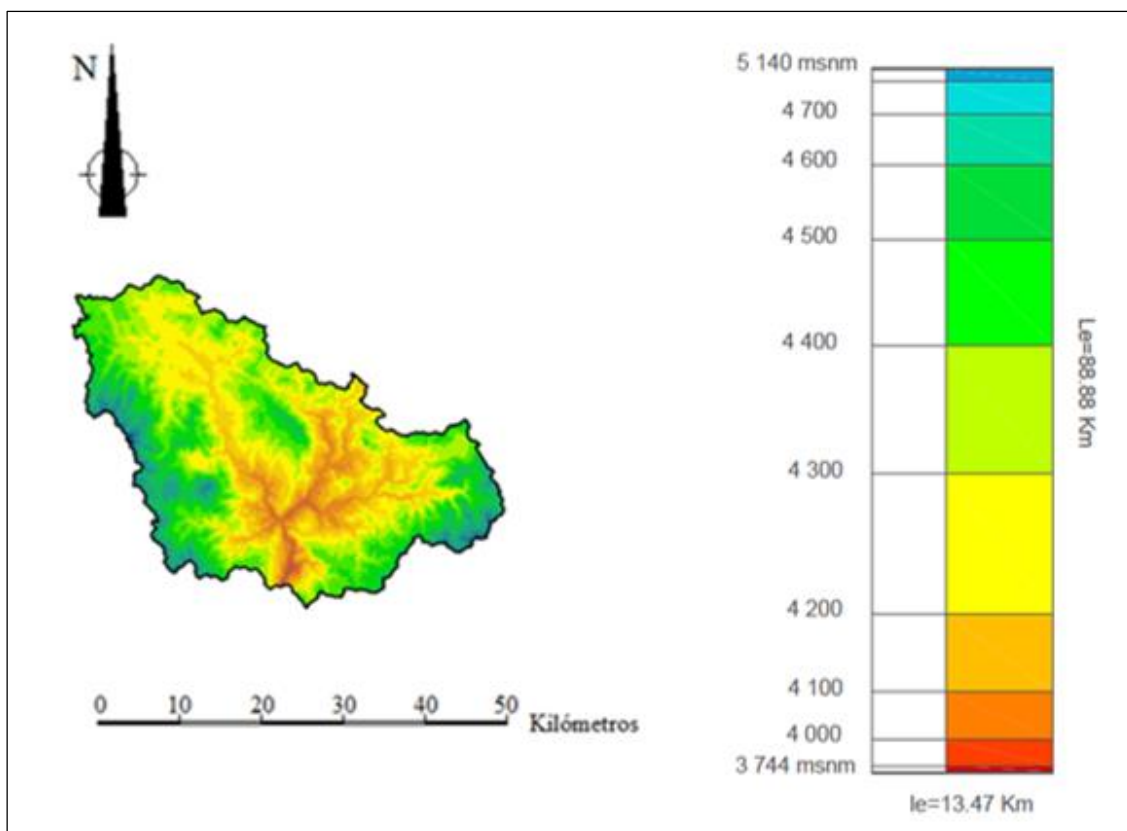


Gráfico 18. Distribución de área entre las curvas de nivel representado en el rectángulo equivalente de la subcuenca del río Paltiture.

Fuente: Elaboración propia – Autocad.

2.2.3. Relieve

El relieve de la cuenca hidrográfica tiene gran influencia sobre los factores meteorológicos e hidrológicos, pues la velocidad de la escorrentía superficial es determinada por la pendiente de la cuenca, mientras que la temperatura, la precipitación, la evaporación y otras variables meteorológicas son funciones de la altitud de la cuenca. Es muy importante, por lo tanto, la determinación de las curvas características del relieve de la subcuenca en estudio.

2.2.3.1. Curvas representativas

Para estimar el área entre curvas de nivel, es necesario contar con un número suficiente de curvas de nivel que expresen la variación altitudinal de la cuenca, tomándose curvas de nivel representativas (D).

Para el cálculo de las curvas representativas a tomar, se hizo uso de la siguiente expresión (Farías, 2015):

$$D = \frac{\text{Cota máx} - \text{Cota mín}}{6} \rightarrow D = \frac{5\,140 - 3\,744}{6} = 232.67 \approx 200 \text{ m}$$

Según el cálculo, la distancia mínima que pueden tener las curvas de nivel para que el cálculo de la curva hipsométrica tenga un resultado fidedigno es de 200 m. Ya que el trabajo se realizó con la ayuda del programa ArcGis, para la realización de la curva hipsométrica se tomaron cotas cada 100 m obteniéndose una mayor precisión en la representación de la variación altitudinal de la cuenca.

En el **Gráfico 19** se muestra el modelo de elevación digital (MDE)⁸ de la subcuenca del río Paltiture con colores diferenciados cada 100 metros.

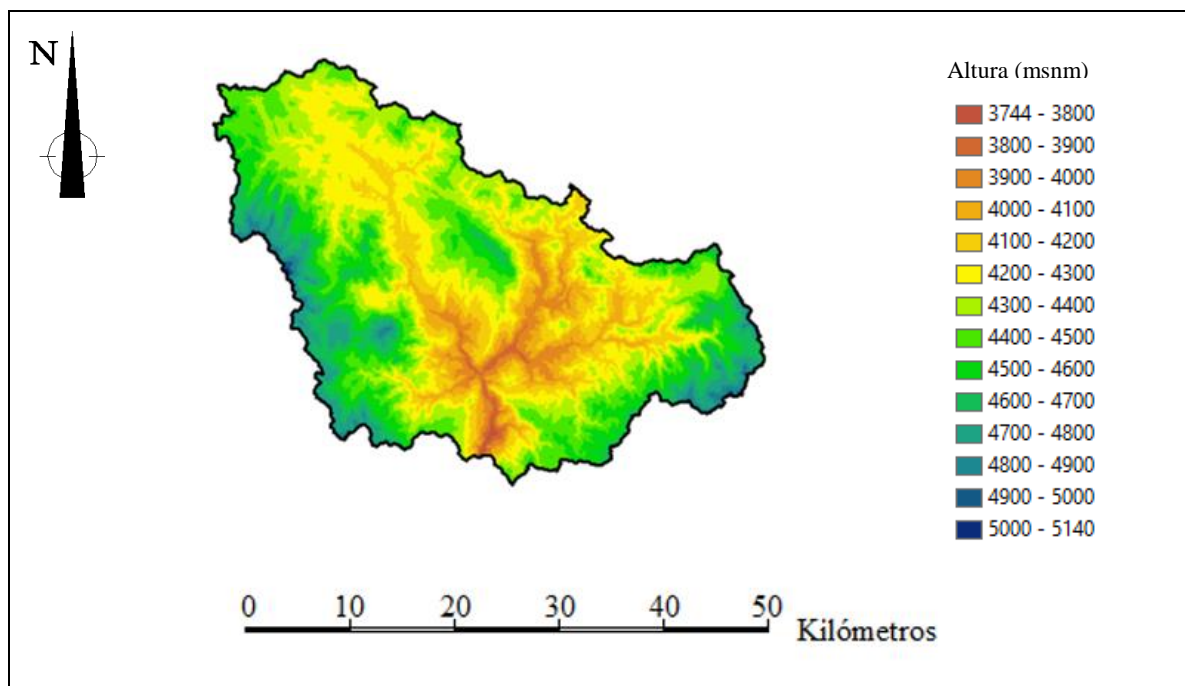


Gráfico 19. Modelo de elevación digital de la subcuenca del río Paltiture.

Fuente: Elaboración propia – ArcGis.

2.2.3.2. Curva hipsométrica

Se define como curva hipsométrica a la representación gráfica del relieve medio de la cuenca, constituida por las longitudes proporcionales a las superficies proyectadas en la cuenca (km²) en el eje de las abscisas, y por las curvas de nivel consecutivas (msnm) en el eje de las ordenadas.

⁸ MDE: Modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel del mar que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando software especializado como por ejemplo ArcGis.

La curva hipsométrica es de importancia porque permite conocer cómo se distribuye el área de una cuenca a distintos niveles topográficos, a fin de comparar características de almacenamiento y flujo entre cuencas.

En el **Gráfico 20** se muestra los tres tipos de curvas hipsométricas y la representación de cada una.

Podemos apreciar que la curva hipsométrica obtenida en la subcuenca del río Paltiture (**Gráfico 21**) es del tipo B, una cuenca en equilibrio, es decir, en la fase de madurez.

La **Tabla 9** muestra las curvas de nivel utilizadas y el área comprendida entre ellas para la elaboración de la curva hipsométrica.

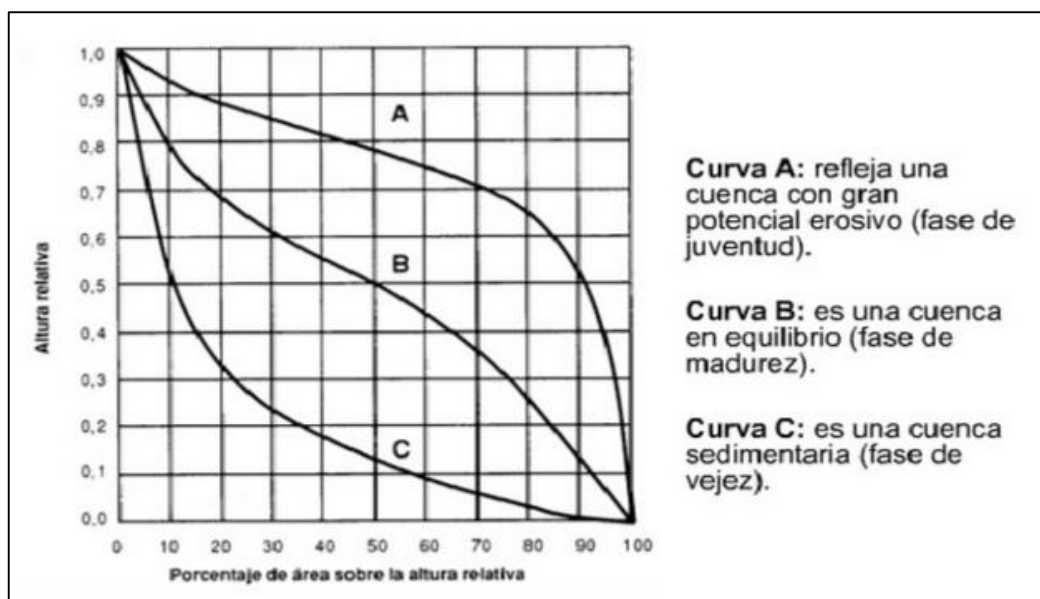


Gráfico 20. Tipos de curvas hipsométricas.

Fuente: <http://www.ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>.

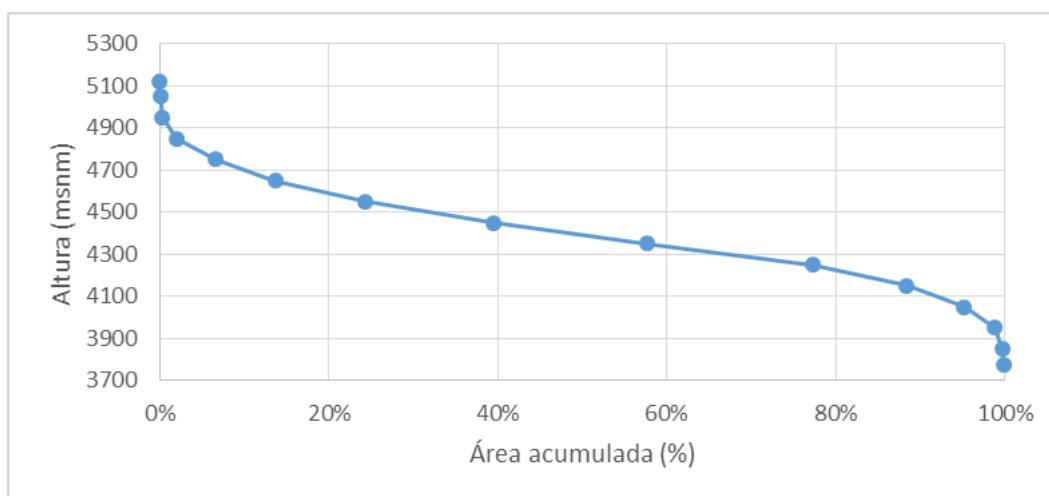


Gráfico 21. Curva hipsométrica de la subcuenca del río Paltiture utilizando las áreas por encima a la cota más alta.

Fuente: Calculado en ArcGis.

Tabla 9. Distribución altimétrica de la subcuenca del río Paltiture.

Cota min (msnm)	Cota max (msnm)	Areas parciales km2	Áreas referidas a la cota más alta			
			Por debajo		Por encima	
			km2	%	km2	%
3744	3800	2.10	2.10	0%	1195.02	100%
3800	3900	10.74	12.83	1%	1184.28	99%
3900	4000	43.20	56.03	5%	1141.09	95%
4000	4100	81.43	137.46	11%	1059.66	89%
4100	4200	132.62	270.08	23%	927.03	77%
4200	4300	236.34	506.43	42%	690.69	58%
4300	4400	217.91	724.34	61%	472.77	39%
4400	4500	181.83	906.17	76%	290.94	24%
4500	4600	126.06	1032.23	86%	164.88	14%
4600	4700	84.46	1116.69	93%	80.42	7%
4700	4800	56.29	1172.98	98%	24.14	2%
4800	4900	20.13	1193.10	100%	4.01	0%
4900	5000	3.02	1196.13	100%	0.99	0%
5000	5100	0.87	1197.00	100%	0.12	0%
5100	5140	0.12	1197.12	100%	0.00	0%
		1197.12				

Fuente: Elaboración propia - ArcGis.

2.2.3.3. Elevación media de la subcuenca

La altura o elevación media de la cuenca, tiene importancia principalmente en zonas montañosas donde influye en el escurrimiento y en otros elementos que también afectan el régimen hidrológico, como el tipo de precipitación, la temperatura, etc.

La variación de la altitud y la elevación media de una cuenca son importantes por la influencia que ejercen sobre la precipitación, sobre las pérdidas de agua por evaporación y transpiración y, consecuentemente, sobre el caudal medio. Variaciones grandes de altitud conllevan diferencias significativas en la precipitación y la temperatura media, la cual a su vez, causan variaciones en la evapotranspiración.

El cálculo de la distribución altimétrica de la subcuenca se muestra en la **Tabla 9** anteriormente presentada, y en el **Gráfico 22** se muestra la distribución altimétrica de la subcuenca en km² y en porcentaje.

El **Gráfico 23** representa la frecuencia de altitudes de la subcuenca.

Los resultados indican que la altitud media de la subcuenca es 4 354.5 msnm.

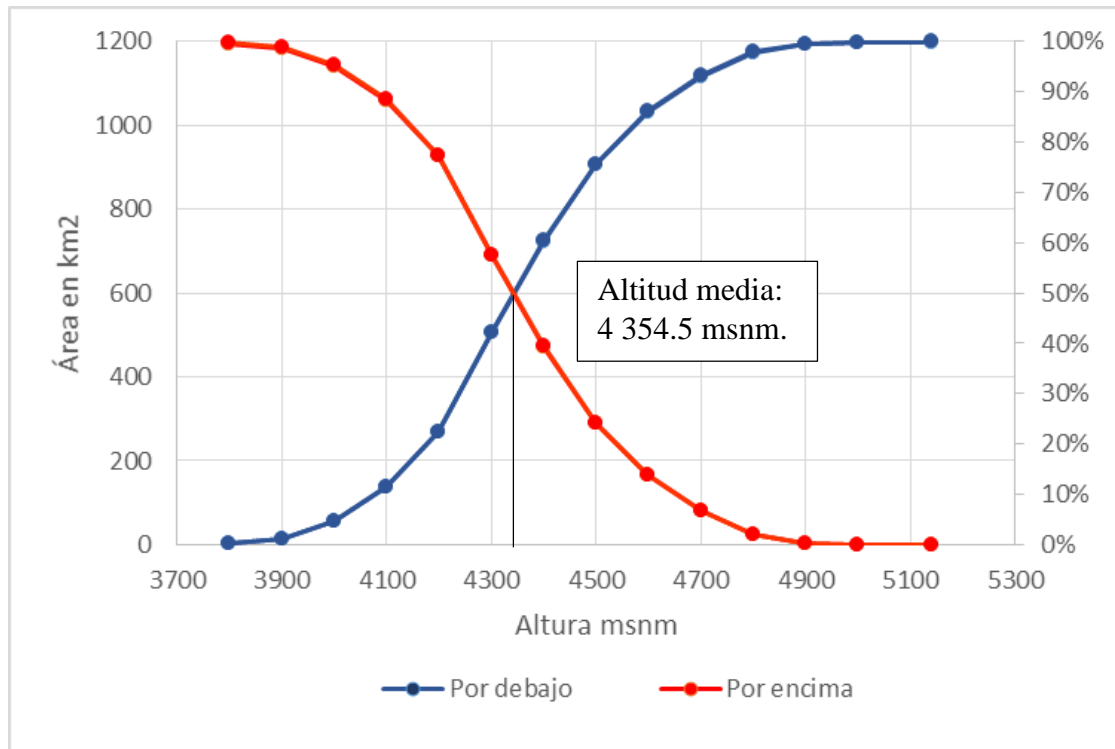


Gráfico 22. Distribución altimétrica de la subcuenca del río Paltiture.
Fuente: Elaboración propia.

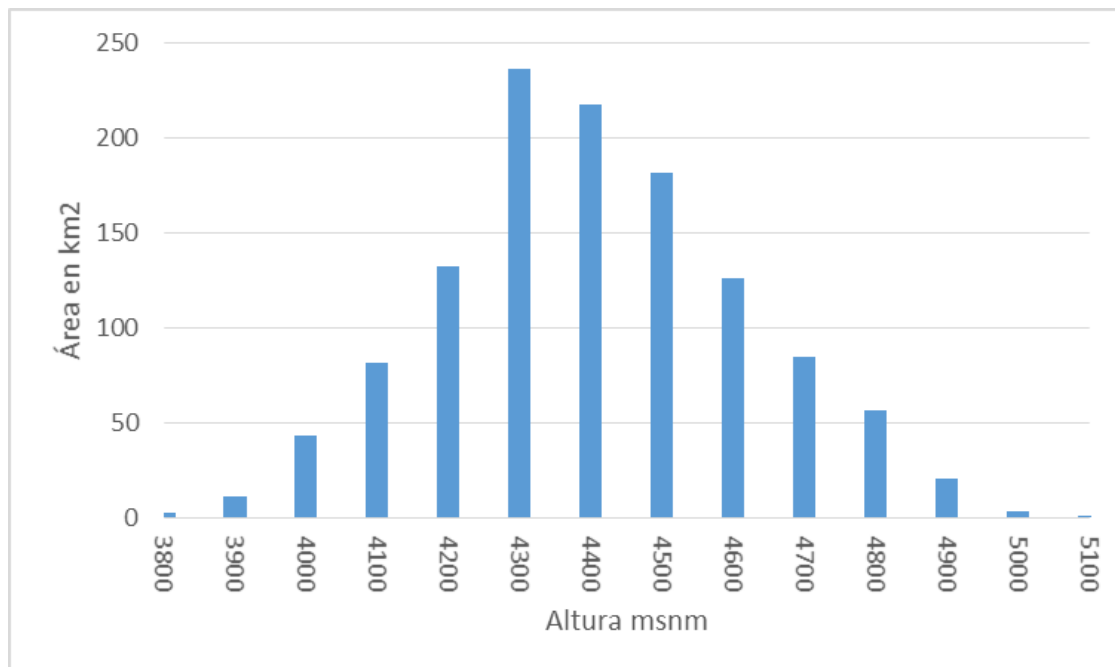


Gráfico 23. Frecuencia de altitudes de la subcuenca del río Paltiture
Fuente: Elaboración propia.

2.2.3.4. Pendiente de la subcuenca

La pendiente de la cuenca (S_g) es un parámetro muy importante ya que influye en el tiempo de concentración de las aguas en un determinado punto del cauce.

Los métodos analíticos más conocidos son el de Alvord y el de Mocornita.

➤ Criterio de Alvord

El criterio de Alvord se representa con la siguiente expresión:

$$S_g = \frac{D}{A} \sum li = \frac{D \times L}{A} \quad S_g = \frac{0.1 \times 2\,251.54}{1\,197.1} * 100 = 18.81\%$$

Donde:

D = Desnivel entre las curvas de nivel en km.

A = Área de la subcuenca en km².

L = Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca en km.

li = Longitud de la curva de nivel "i" en km.

La pendiente de la subcuenca es 18.81%.

En la **Tabla 10** se muestra la longitud de las curvas de nivel tomadas desde la cota 3 750 hasta 5 100, tomando en cuenta la separación de las curvas cada 100 m. Para este cálculo se hizo uso de los programas GoogleEarth, Global Mapper16, Autocad.

Tabla 10. Longitud de las curvas de nivel entre las cotas 3 800 y 5 100 msnm.

Cota	Long. Curva (m)	Long. Curva (Km)
3 800	48 976.54	48.98
3 900	162 614.07	162.61
4 000	251 307.07	251.31
4 100	374 046.01	374.05
4 200	458 130.45	458.13
4 300	370 477.11	370.48
4 400	292 110.97	292.11
4 500	152 059.76	152.06
4 600	92 121.58	92.12
4 700	41 646.83	41.65
4 800	6 100.71	6.10
4 900	1 343.63	1.34
5 000	483.12	0.48
5 100	120.78	0.12
Total	2 251 538.63	2 251.54

Fuente: Elaboración propia – GoogleEarth, Global Mapper 16 y Autocad.

➤ Criterio de Mocornita

Este método es parecido al anterior con la diferencia que se añade el factor (f) de ponderación a las longitudes de la curva de nivel, siendo 0.5 para la menor y mayor curva de nivel dentro de la subcuenca, y 1 para todas las demás curvas de nivel. Al final se obtiene la siguiente ecuación:

$$Sg = \frac{D}{A} \sum li * fi \qquad Sg = \frac{0.1}{1\ 197.1} * 2\ 226.99 = 18.60\%$$

En la **Tabla 11** se muestra la longitud de las curvas de nivel entre las cotas 3 800 y 5 100 msnm, multiplicadas por el factor de ponderación correspondiente.

La pendiente de la subcuenca, utilizando el método de Mocornita, es de 18.60%. Se puede apreciar que no varía mucho con respecto al método de Alvord, porque la longitud de la menor y mayor curva de nivel, no son muy significativas, por lo tanto al multiplicarlas por el factor 0.5, dará como resultado un producto no muy significativo.

Para el cálculo de la pendiente de la subcuenca, también se utilizó el programa ArcGis, que promedia la pendiente de cada celda en formato raster⁹ dando como resultado 12% de pendiente que, con relación a los resultados obtenidos analíticamente, se tiene una discrepancia del 33%.

Tabla 11. Longitud de las curvas de nivel entre las cotas 3 800 y 5 100 msnm.

Cota	Long. Curva (m)	Long. Curva (Km)	Factor de pond. (f)	f * li
3 800	48 976.54	48.98	0.5	24.49
3 900	162 614.07	162.61	1	162.61
4 000	251 307.07	251.31	1	251.31
4 100	374 046.01	374.05	1	374.05
4 200	458 130.45	458.13	1	458.13
4 300	370 477.11	370.48	1	370.48
4 400	292 110.97	292.11	1	292.11
4 500	152 059.76	152.06	1	152.06
4 600	92 121.58	92.12	1	92.12
4 700	41 646.83	41.65	1	41.65
4 800	6 100.71	6.10	1	6.10
4 900	1 343.63	1.34	1	1.34
5 000	483.12	0.48	1	0.48
5 100	120.78	0.12	0.5	0.06
Total	2 251 538.63	2 251.54		2 226.99

Fuente: Elaboración propia – GoogleEarth, Global Mapper 16 y Autocad.

⁹ Raster: El modelo raster es un método para el almacenamiento, el presado y visualización de datos geográficos.

2.2.3.5. Perfil longitudinal del curso de agua

La importancia de conocer el perfil longitudinal del curso principal radica en que nos proporciona una idea de las pendientes que tiene el cauce en diferentes tramos de su recorrido y es un factor de importancia para ciertos trabajos, como control de las aguas, puntos de captación y ubicación de posibles centrales hidroeléctricas.

En el **Gráfico 24** se puede apreciar el perfil longitudinal del curso de agua en la subcuenca del río Paltiture.

2.2.3.6. Pendiente del cauce

La velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua en una cuenca depende de la pendiente de los canales fluviales. En cuanto mayor sea la pendiente, se tendrá una mayor velocidad del flujo y por ende es un factor característico del tiempo de respuesta de la cuenca ante las precipitaciones.

El cálculo de la pendiente del cauce se realizará de dos formas:

➤ Un solo tramo:
$$\frac{\text{Cota máx} - \text{Cota min}}{\text{Long. cauce}} = \frac{4\,406 - 3\,744}{50.4} = 13.13 \text{ m/km}$$

- Áreas compensadas: El área bajo perfil mediante trapecios debe ser igual al área de un triángulo.

$$\begin{aligned} \text{Área bajo perfil} &= \text{Área del triángulo} \\ 15\,556\,640 \text{ m}^2 &= \frac{50\,400 * h}{2} \rightarrow h = 617.33 \text{ m} \\ \text{Pendiente} &= \frac{617.33}{50.4} = 12.25 \text{ m/km} \end{aligned}$$

En la **Tabla 12** se muestra el cálculo de las áreas bajo perfil mediante trapecios.

Tabla 12. Cálculo del área bajo perfil mediante trapecios.

Progresiva (m)	Cota (msnm)	Área Perfil (m ²)
0+000	3 744	---
3+230	3 800	90 440
13+540	3 900	1 092 860
18+800	4 000	1 083 560
25+480	4 100	2 044 080
40+470	4 200	6 085 940
49+230	4 300	4 432 560
50+430	4 400	727 200
	Total:	15 556 640

Fuente: Elaboración propia.

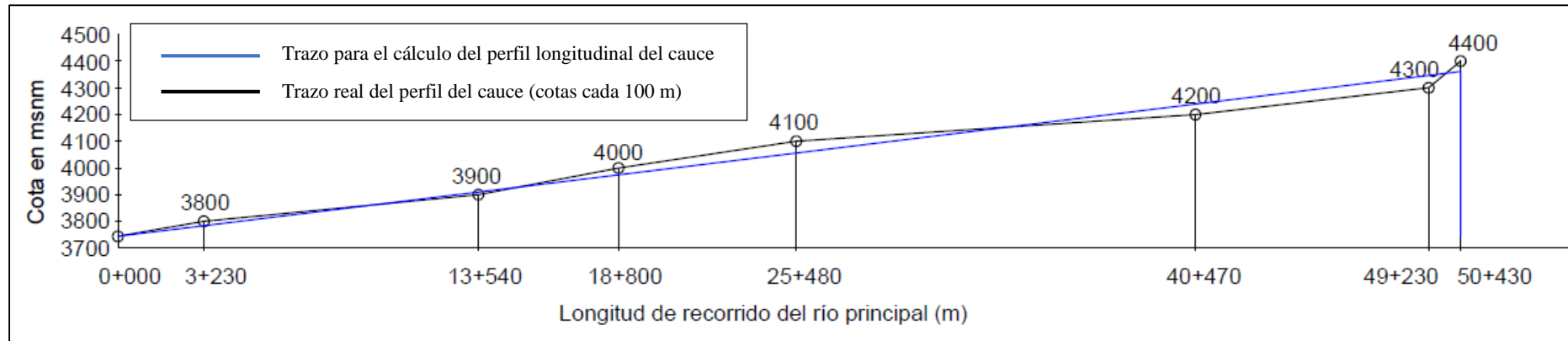


Gráfico 24. Perfil longitudinal del cauce de la subcuenca del río Paltiture.

Fuente: Elaboración propia - Google Earth.

2.2.4. Parámetros de la red hidrográfica

La forma en que esté conectada la red hidrográfica en una cuenca determinada, influye en la respuesta de esta a un evento de precipitación.

Estos parámetros son muy importantes porque manifiestan la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante, es decir, la rapidez con que desaloja la cantidad de agua que recibe.

Con la finalidad de determinar las características del sistema hidrográfico, se definen los siguientes parámetros: Grado de ramificación y sistema de drenaje.

2.2.4.1. Grado de ramificación

Para determinar el grado de ramificación en una cuenca, se utiliza el modelo de STRAHLER. Se toman como corrientes de primer orden todos aquellos que no tengan afluentes; cuando se unen dos corrientes de primer orden forman una de segundo orden y así sucesivamente. El orden que tiene la subcuenca del río Paltiture es 5 (**Gráfico 25**).

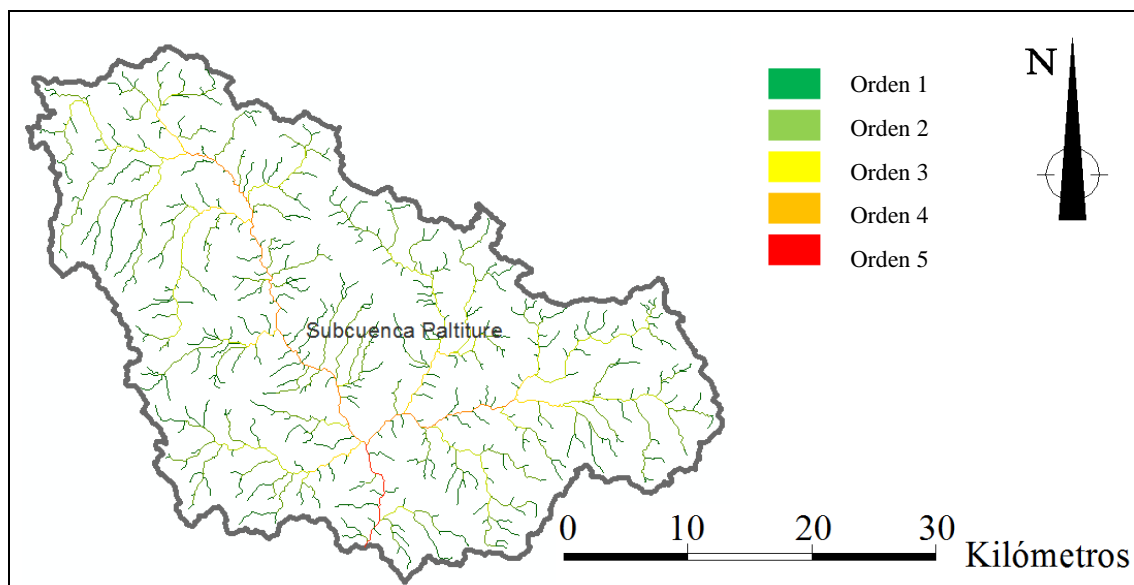


Gráfico 25. Grado de ramificación en la subcuenca del río Paltiture.

Fuente: Elaboración propia – ArcGis.

2.2.4.2. Sistema de drenaje

El sistema de drenaje de una cuenca está constituido por el cauce principal y sus tributarios. El estudio de sus ramificaciones y el desarrollo del sistema son importantes, pues indican la mayor o la menor velocidad con que el agua deja la cuenca hidrográfica.

a. Longitud de máximo recorrido

Es la medida de la mayor trayectoria de las partículas del flujo comprendida entre el punto más bajo del colector común, conocido como punto emisor, y el punto más alto o inicio del recorrido de la cuenca. Este parámetro tiene relación directa con el tiempo de concentración de la cuenca, el mismo que depende de la geometría de la cuenca, de la pendiente del recorrido y de la cobertura vegetal.

La subcuenca en estudio tiene una longitud de máximo recorrido de 50.4 km, determinado con el programa ArcGis y Autocad.

b. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje indica la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca, ya sea efímeros, intermitentes o perennes, y su área total.

Valores altos de densidad reflejan una cuenca muy bien drenada que debería responder relativamente rápido al influjo de la precipitación, es decir, tienen tiempos de concentración cortos; mientras que una cuenca con baja densidad de drenaje refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta.

La expresión de la densidad de drenaje, es:

$$Dd = \frac{Lt}{A} \qquad Dd = \frac{891.7}{1197.1} = 0.74 \text{ km/km}^2$$

Donde:

Dd = Densidad de drenaje en km/km².

Lt = Longitud total de la red de drenaje en km.

A = Área de la cuenca en km².

Tabla 13. Rangos de la densidad de drenaje.

Densidad de Drenaje (K/Km ²) Dd	
Baja Baja	< 0.476
Media Baja	0.476 - 0.538
Media Media	0.539 - 0.597
Media Alta	0.598 - 0.941
Alta Alta	> 0.941

Fuente: <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/AbrilMayo2005/CD1/pdf/spa/doc2240/doc2240-3.pdf>

Según la **Tabla 13**, la subcuenca del río Paltiture tiene una densidad de drenaje media alta. Esto nos indica que la subcuenca tiene eficiencia de drenaje ante la ocurrencia de tormentas.

2.2.5. Resumen de las características geomorfológicas

En la **Tabla 14** se presenta un resumen con los valores de las características geomorfológicas de la subcuenca del río Paltiture.

Tabla 14. Características geomorfológicas de la Sub-cuenca del río Paltiture

Descripción	Símbolo	Valores	Unidad
Área	A	1 197.1	Km ²
Perímetro	P	204.7	Km
Longitud máx. recorrido	L	50.4	Km
Ancho promedio	Ap	23.8	Km
Coef. de forma	Kf	0.47	
Coef. de compacidad	Kc	1.67	
Rectángulo equivalente	Le	88.9	Km
	le	13.5	Km
Dist. entre curvas	D	0.10	Km
Pendiente del cauce	Un solo tramo	13.1	m/km
	Áreas comp.	12.3	m/km
Pendiente de la cuenca	Alvord	18.81	%
	Mocornita	18.60	%
	ArcGis	12.00	%
Cota máxima		5 140	msnm
Altitud media	E	4 354.5	msnm
Cota mínima		3 744	msnm
Longitud total red drenaje	Lt	891.7	Km
Densidad de drenaje	Dd	0.74	Km/Km ²

Fuente: Elaboración propia

En resumen la subcuenca del río Paltiture presenta una forma alargada, como se pudo observar en el rectángulo equivalente, no tiene un tiempo de escorrentía retardado, es decir, tiene una alta eficiencia de drenaje y por ende una baja probabilidad a las inundaciones ante la ocurrencia de tormentas.

Capítulo 3

Estudio de los parámetros que intervienen en el balance hídrico superficial

3.1. Período para el cálculo del balance

Según la “Guía de balance hídrico superficial” realizado por la UNESCO, el período para el cálculo del balance de agua está condicionado por: la superficie y topografía de la zona, los parámetros hídricos que se deciden analizar para tipificar el fenómeno, los datos realmente factibles de obtener en las redes de estaciones y la disponibilidad de información simultánea en toda la zona.

Si bien el período medio recomendable para caracterizar el balance es del orden de 30 años, se considera que, también es realmente factible realizar un balance para un período más corto, como por ejemplo de 15 años.

Para el presente estudio se han obtenido datos pluviométricos desde 1995 hasta 2010, por lo que se tomará como tiempo de análisis 16 años.

3.2. Ubicación de las estaciones

En el apartado 1.5.2 referente a “*Hidrología*”, se mostraron las estaciones pluviométricas pertenecientes a la cuenca del río Tambo. Como se pudo ver en el **Gráfico 7**, la subcuenca del río Paltiture no cuenta con estaciones dentro de ella por encontrarse en un lugar de difícil acceso, por lo que para la realización del balance hídrico se hará uso de las estaciones más cercanas, siendo éstas las estaciones Ichuña, Lagunillas y Crucero Alto (**Tabla 15**).

En el **Gráfico 26** se puede apreciar que las estaciones Lagunillas, Crucero Alto y Pampa Umalzo, se encuentran fuera de la limitación de la cuenca del río Tambo; a pesar de eso, el SENAMHI las considera pertenecientes a esta cuenca.

Tabla 15. Datos generales de las estaciones para el estudio del balance hídrico de la subcuenca del río Paltiture.

Estación	Ubicación geográfica		Ubicación Política			Altitud (msnm)	Variables	Periodo de Registro
	Latitud	Longitud	Distrito	Provincia	Departamento			
Ichuña	16° 08' S	70° 32' O	Ichuña	General Sanchez Cerro	Moquegua	3792	Precipitación total mensual	1995 - 2010
							Temperatura media mensual	1995 - 2010
							Evaporación total mensual	1995 - 2010
Lagunillas	15° 46' S	70° 39' O	Santa Lucia	Lampa	Puno	4250	Precipitación total mensual	1995 - 2010
							Temperatura media mensual	1995 - 2010
Crucero Alto	15° 46' S	70° 55' O	Santa Lucia	Lampa	Puno	4470	Precipitación total mensual	1995 - 2010
							Temperatura media mensual	1995 - 2010

Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015, e información brindada por el SENAMHI – 01 de Julio de 2015.

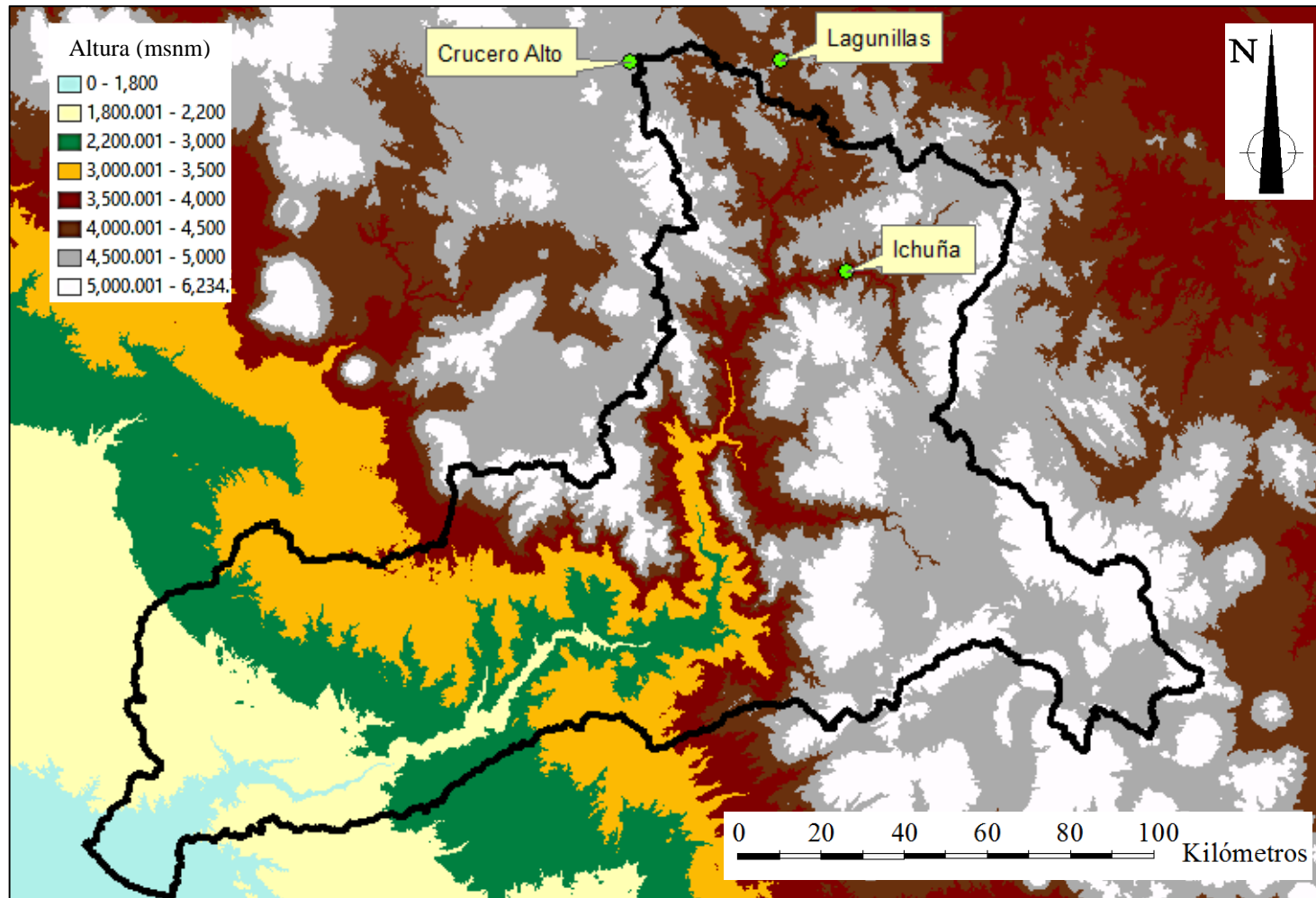


Gráfico 26. Ubicación de las estaciones pluviométricas que intervendrán en el balance hídrico superficial de la subcuenca del río Paltiture.
Fuente: Elaboración propia – ArcGis.

3.3. Precipitación

Se denomina precipitación al agua que proviene de la humedad atmosférica y cae a la superficie terrestre, principalmente en estado líquido como lluvia, o sólidos como nieve o granizo (UNESCO, 1982).

Como generalmente, las precipitaciones son la única fuente de humedad que llega a la superficie terrestre, la exactitud en su medición y su evaluación es determinante en el resultado del balance hídrico. Lamentablemente, no se puede estimar con un alto grado de exactitud ya que una parte del error radica en la pérdida que tiene la precipitación en la caída (UNESCO, 1982).

La subcuenca del río Paltiture, por encontrarse en la sierra sur del país, tiene un régimen de precipitaciones claramente estacional, en el que se esperan meses lluviosos a medida que se acerca el verano y prolongados meses secos al concluir esta estación. Sin embargo, la variación del volumen e intensidad de períodos lluviosos y secos resulta notable a lo largo del año. Para el presente análisis se ha utilizado la información registrada en las estaciones pluviométricas de Ichuña, Lagunillas y Crucero Alto.

3.3.1. Estimación de datos faltantes

Ya que la información obtenida se encuentra incompleta, se realizó la estimación de la información pluviométrica mensual faltante, según los métodos mostrados a continuación:

3.3.1.1. Promedio aritmético simple

Consiste en realizar un promedio aritmético simple entre los registros de las estaciones vecinas a la estación donde se desea obtener el dato faltante. Este método se recomienda cuando la precipitación total anual de las estaciones en cuestión no varía más de un 10%.

Ya que la variación entre las estaciones es mayor a 10%, no se pudo utilizar este método.

3.3.1.2. Promedio aritmético de la tasa de lluvia

Como se mencionó anteriormente, la variación entre las estaciones es mayor a 10%, esto es muy común en zonas montañosas como lo es la zona de estudio; por lo que la mejor opción para estimar los datos faltantes es promediar la relación, entre el registro del período faltante y la lluvia promedio de cada una de las “n” estaciones, de modo que despejando se obtiene la siguiente expresión:

$$Px = \frac{PPx}{n} \left(\frac{Pa}{PPa} + \frac{Pb}{PPb} + \frac{Pc}{PPc} + \dots \right)$$

Donde:

Px = Dato de precipitación faltante estimado en la estación X.

PPx, PPa, etc. = Promedio de las precipitaciones anuales en las estaciones X, A, etc. sin considerar la fecha con dato faltante.

Pa, Pb, Pc = Precipitación en las estaciones A, B, C, etc. durante el período faltante en la estación X.

De esta manera se calcularon todos los datos pluviométricos faltantes de las estaciones Ichuña, Lagunillas y Crucero Alto (**Tabla 16**, **Tabla 17** y **Tabla 18**).

Tabla 16. Precipitación total mensual y anual (mm) – Estación Ichuña.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	85.2	67.5	111.2	16.6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	1.9	25.7	81.6	390.1
1996	145.7	139.9	54.4	31.9	8.9	0.0	0.0	22.9	2.1	7.5	37.0	67.6	517.9
1997	145.9	200.7	27.8	33.7	8.5	0.0	0.0	19.4	41.9	14.1	47.3	54.9	594.2
1998	192.3	94.0	50.5	8.6	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	2.6	55.6	27.5	432.6
1999	62.0	214.3	183.1	54.4	1.3	0.0	0.0	4.7	0.5	45.0	1.0	68.0	634.3
2000	198.4	142.7	54.4	21.1	3.1	0.0	0.0	4.7	0.0	30.0	5.1	118.4	577.9
2001	233.6	195.3	116.0	38.9	4.1	0.0	0.5	6.7	2.6	23.4	29.3	83.1	733.5
2002	73.6	176.6	180.8	44.0	7.0	0.5	18.3	0.6	7.1	45.2	44.6	80.6	678.9
2003	76.2	120.7	110.2	27.1	3.2	0.0	0.0	4.1	0.0	14.6	1.7	62.3	420.1
2004	139.1	123.7	79.4	51.5	0.0	0.0	14.9	9.4	18.0	0.0	14.0	48.1	498.1
2005	114.1	168.6	58.6	27.1	0.0	0.0	0.0	0.0	17.7	4.7	27.4	77.0	495.2
2006	185.5	83.8	110.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	10.9	63.7	91.9	574.8
2007	144.3	57.4	139.4	28.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	9.9	29.6	95.0	505.3
2008	174.2	91.6	67.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	5.7	0.0	136.5	478.8
2009	73.2	161.6	48.6	36.9	1.2	0.0	13.6	0.0	26.5	7.6	60.9	86.4	516.5
2010	129.8	191.0	30.5	38.7	10.5	0.0	1.7	0.0	0.0	8.6	5.2	68.6	484.6
Máximo	233.6	214.3	183.1	54.4	10.5	1.5	18.3	22.9	41.9	45.2	63.7	136.5	733.5
Promedio	135.8	139.3	88.9	29.8	3.0	0.1	3.1	4.7	8.1	14.5	28.0	78.0	533.3
Mínimo	62.0	57.4	27.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.5	390.1

Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015

Tabla 17. Precipitación total mensual y anual (mm) – Estación Lagunillas.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	103.0	121.6	121.7	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	4.4	36.6	91.4	500.3
1996	131.8	107.6	46.2	45.9	16.0	0.0	0.0	37.1	4.4	3.0	58.1	113.7	563.8
1997	158.4	208.6	72.3	24.4	0.0	0.0	0.0	30.1	46.9	13.8	65.2	62.9	682.6
1998	187.8	75.3	124.6	17.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.6	93.0	27.1	540.6
1999	180.1	203.5	203.0	95.9	12.7	0.0	0.0	4.2	4.0	57.1	4.2	74.9	839.6
2000	143.8	208.3	177.0	6.0	7.5	0.0	0.0	1.2	0.0	11.2	22.9	130.1	708.0
2001	189.8	171.1	114.4	67.3	4.8	1.5	4.0	13.9	2.4	17.3	9.5	100.5	696.5
2002	192.3	163.8	134.7	87.7	15.1	0.0	24.3	5.6	2.3	29.4	98.6	119.0	872.8
2003	153.7	151.0	120.8	27.2	9.7	6.3	0.0	0.0	2.7	2.4	2.0	102.3	578.1
2004	171.1	155.0	86.2	60.8	0.0	0.0	12.2	12.9	0.0	10.0	29.0	69.9	607.1
2005	230.8	225.0	53.9	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5	1.8	89.3	112.5	728.7
2006	252.9	112.9	173.1	33.5	0.1	0.0	0.0	1.5	9.0	14.5	83.0	102.2	782.7
2007	138.9	82.1	172.2	40.0	3.4	0.1	0.7	0.0	2.8	13.3	45.1	88.9	587.5
2008	218.3	87.8	64.4	0.2	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	10.7	7.4	147.7	539.0
2009	91.5	187.3	54.5	44.1	1.0	0.0	9.7	0.0	19.0	7.4	86.3	79.7	580.5
2010	187.2	132.3	51.3	52.2	12.0	0.7	0.8	0.2	1.4	11.1	8.4	80.2	537.8
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Máximo	252.9	225.0	203.0	95.9	16.0	6.3	24.3	37.1	46.9	57.1	98.6	147.7	872.8
Promedio	170.7	149.6	110.6	38.6	5.1	0.5	3.2	6.8	7.3	13.9	46.2	93.9	646.6
Mínimo	91.5	75.3	46.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	2.0	27.1	500.3

Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015

Tabla 18. Precipitación total mensual y anual (mm) – Estación Crucero Alto.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	86.1	135.1	16.2	31.5	0.1	0.0	0.0	0.5	8.7	16.7	49.1	67.8	411.8
1996	98.3	77.2	92.7	49.9	13.7	0.0	0.0	11.0	0.4	4.1	14.0	21.3	382.6
1997	170.2	165.1	65.1	32.4	14.8	0.0	0.0	21.5	24.1	0.5	48.6	41.4	583.7
1998	159.3	69.8	93.1	16.7	0.0	11.4	0.0	2.6	1.7	20.5	39.7	53.2	468.0
1999	183.1	101.2	172.9	44.4	6.2	0.0	0.0	7.1	2.8	52.2	0.0	54.6	624.5
2000	173.3	129.0	59.6	10.2	12.5	4.3	0.0	1.6	0.2	41.3	10.0	97.2	539.2
2001	226.0	185.0	100.6	50.1	6.5	0.7	0.0	5.4	0.5	13.8	29.3	29.1	647.0
2002	88.3	179.4	92.5	29.5	8.9	3.4	20.6	0.2	0.3	47.7	27.9	143.2	641.9
2003	97.0	124.9	104.2	27.6	6.4	0.5	0.0	6.6	2.9	0.4	1.7	68.3	440.5
2004	138.6	108.9	87.8	53.7	0.0	0.0	13.3	7.0	5.1	2.3	8.4	38.8	463.9
2005	151.6	121.7	57.6	53.7	0.0	0.0	0.0	0.0	10.4	2.9	19.7	96.7	514.3
2006	148.7	119.1	152.0	39.3	0.2	0.1	0.0	2.7	6.9	5.4	53.4	55.4	583.2
2007	89.1	78.0	162.5	36.3	4.6	0.2	2.1	0.0	5.6	10.8	32.1	50.2	471.5
2008	196.3	53.6	38.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	11.4	10.6	103.9	414.7
2009	82.1	147.9	45.0	33.4	0.0	0.0	8.8	0.0	13.5	3.4	56.8	44.2	435.1
2010	189.2	192.6	64.4	45.9	4.8	1.3	0.1	0.3	3.4	8.6	6.3	25.0	541.9
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Máximo	226.0	192.6	172.9	53.7	14.8	11.4	20.6	21.5	24.1	52.2	56.8	143.2	647.0
Promedio	142.3	124.3	87.8	34.7	4.9	1.4	2.8	4.2	5.4	15.1	25.5	61.9	510.2
Mínimo	82.1	53.6	16.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	21.3	382.6

Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015

3.3.2. Análisis de consistencia de la información pluviométrica

La inconsistencia en series hidrológicas representa uno de los aspectos más importantes, ya que cuando no se ajustan a las condiciones futuras, la inconsistencia en la muestra histórica puede generar un error significativo en todos los análisis futuros que se realicen, obteniéndose resultados altamente sesgados. Esta inconsistencia se pone de manifiesto con la presencia de saltos y/o tendencias en las series hidrológicas afectando las características estadísticas de dichas series, tales como la media, desviación estándar y correlación serial (UNESCO, 1982).

El análisis de consistencia de la información es el proceso que consiste en la identificación y corrección de la inconsistencia de una serie de tiempo hidrológica. En este sentido, se ha procedido al análisis de consistencia de la información histórica anual de la precipitación, a través de la identificación y estimación de los componentes determinísticos y transitorios de las series: saltos y tendencias (UNESCO, 1982).

Para el análisis de consistencia se emplean las curvas dobles acumuladas, en las cuales se relaciona la precipitación anual acumulada de una estación, con el correspondiente patrón de precipitación acumulada (PPA). En el **Gráfico 27** se muestra el análisis de consistencia para las tres estaciones pluviométricas.

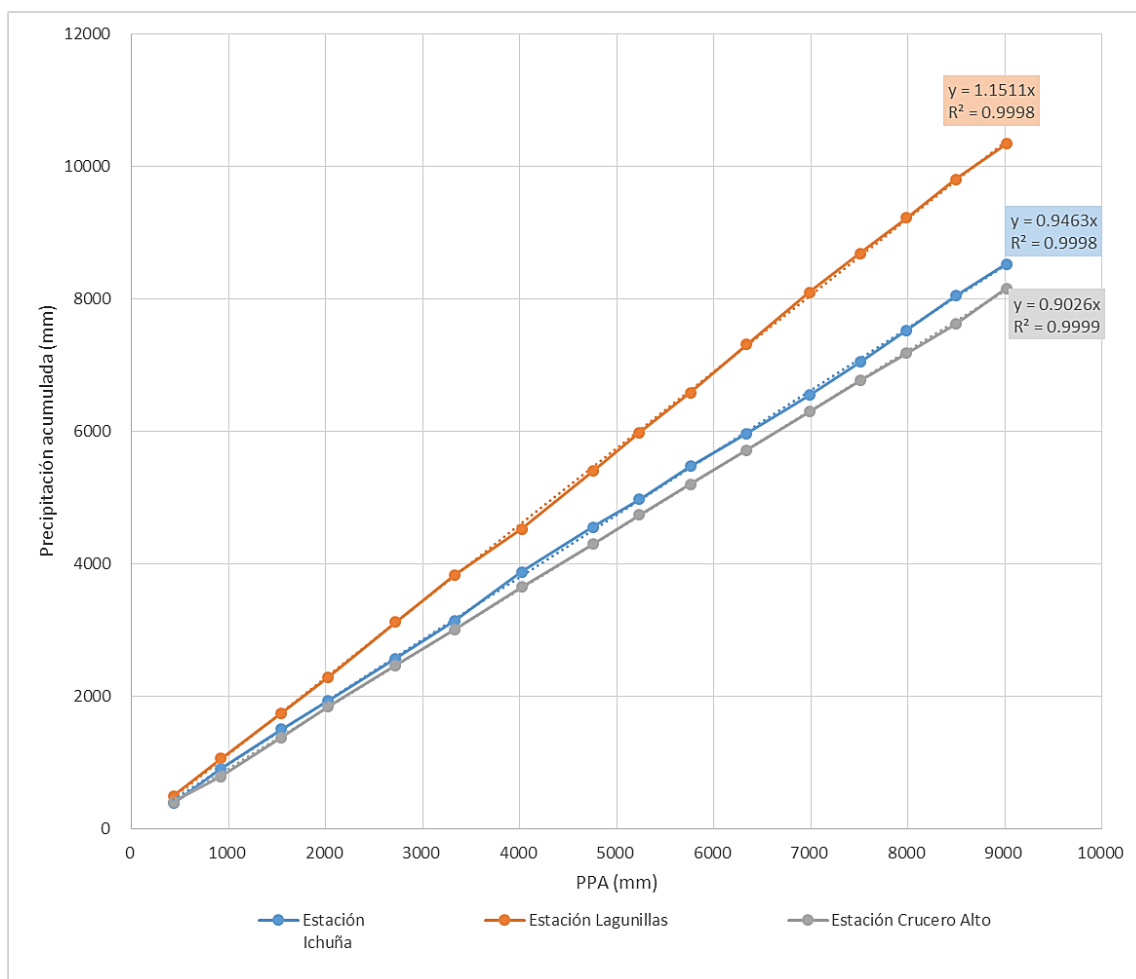


Gráfico 27. Análisis de consistencia – CDA.

Fuente: Elaboración propia.

Se debe tener en cuenta que el cambio de pendiente debe estar definido por al menos un período de 5 años consecutivos, ya que generalmente los datos obtenidos suelen tener ondulaciones respecto a la tendencia media debido a dispersiones lógicas que se producen en este tipo de observaciones.

Se considera como una buena relación de datos pluviométricos cuando el coeficiente de determinación, es decir el R cuadrado, es igual o mayor a 0.9995. Por lo tanto, se puede afirmar que el ajuste de los datos obtenidos es correcto y éstos se estiman confiables.

Se puede apreciar del **Gráfico 27** que la cantidad de lluvia en las tres estaciones se ha mantenido constante a lo largo de los 16 años de análisis, es decir, se ha mantenido un mismo ciclo hidrológico en la zona de estudio.

3.3.3. Precipitación de la subcuenca

La precipitación en la subcuenca del río Paltiture está determinada de la siguiente manera: La época más lluviosa se da entre los meses de Octubre y Abril, y la época de estiaje se produce entre los meses de Mayo y Septiembre. El mes más lluvioso es Enero con máximos mensuales de 233.6, 252.9 y 226 mm en las tres estaciones, respectivamente;

mientras que el mes menos lluvioso es Junio llegando a tener precipitación nula en todas las estaciones (**Gráfico 28**, **Gráfico 29** y **Gráfico 30**).

La precipitación se ha graficado según el ciclo hidrológico para su mejor apreciación.

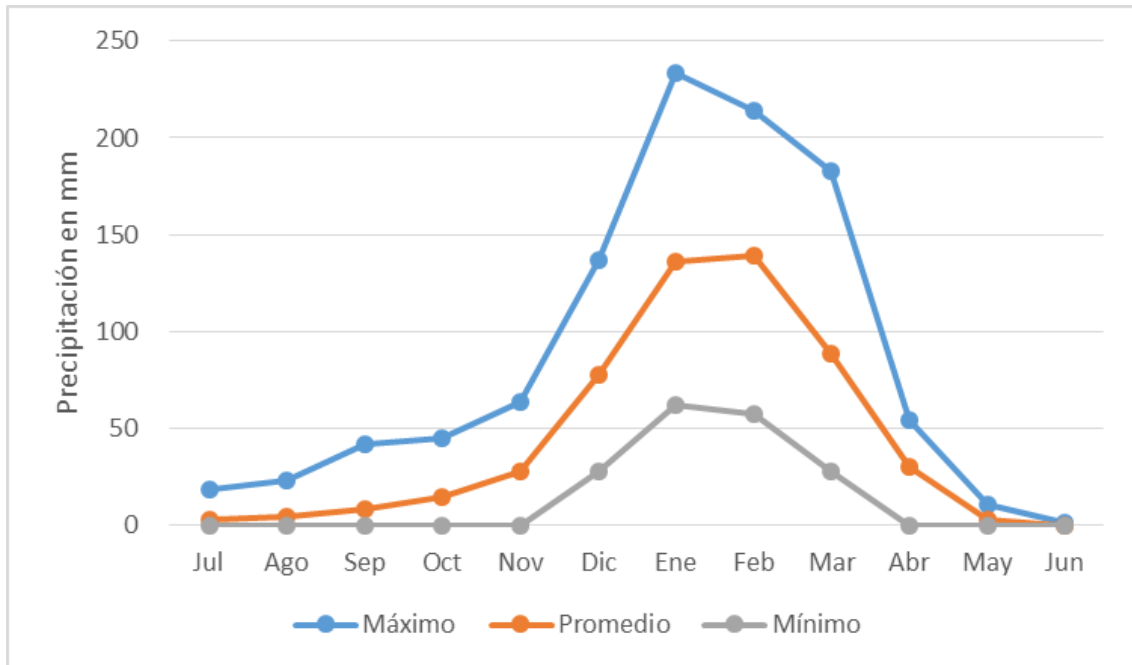


Gráfico 28. Diagrama de precipitación media mensual (mm) – Estación Ichuña.
Fuente: SENAMHI, 12 de Marzo de 2015.

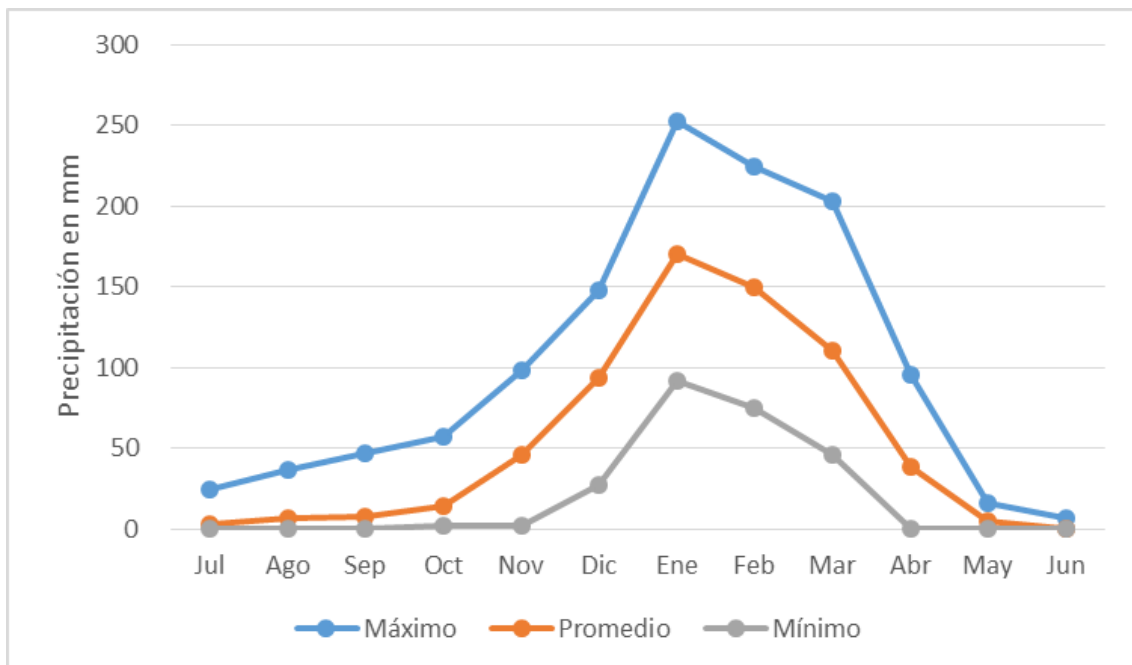


Gráfico 29. Diagrama de precipitación media mensual (mm) – Estación Lagunillas.
Fuente: SENAMHI, 12 de Marzo de 2015.

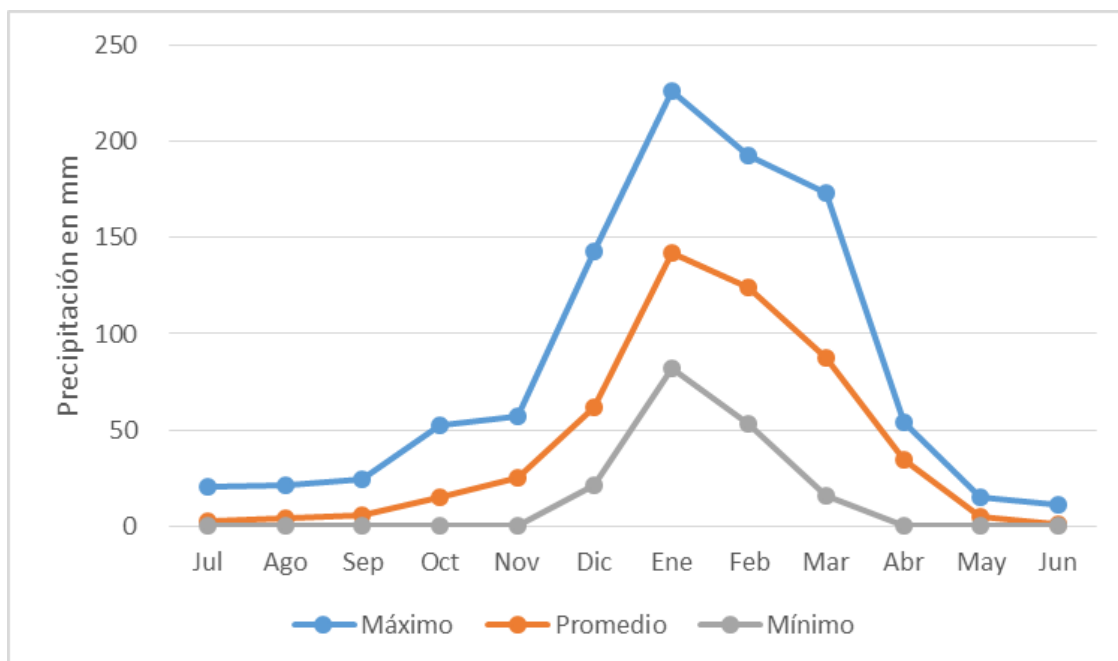


Gráfico 30. Diagrama de precipitación media mensual (mm) – Estación Crucero Alto.
Fuente: SENAMHI, 12 de Marzo de 2015.

3.3.4. Precipitación promedio en la subcuenca

Para evaluar la cantidad promedio de precipitación sobre un área, es necesario basarse en los valores puntuales obtenidos de las estaciones para determinados períodos de tiempo.

Para el presente estudio se ha evaluado la precipitación media mensual en la subcuenca.

a. Método de la media aritmética

Este método consiste en sacar el promedio aritmético de los valores de precipitación de las estaciones, sin embargo, sólo proporcionaría resultados confiables si la distribución de las estaciones sobre un área es uniforme y la variación de los datos obtenidos de cada estación no es muy grande.

Ya que nuestros datos tienen variaciones considerables, no sería de mucha utilidad realizar este método en la subcuenca del río Paltiture, ya que además la zona de estudio tiene una topografía accidentada.

b. Método de Thiessen

Este método se emplea cuando la distribución de las estaciones no es uniforme, por lo que será muy útil para la zona de estudio.

Para su cálculo se define la zona de influencia de cada estación, para lo que se trazan triángulos que unen las estaciones más próximas, estas líneas se bisecan con líneas

perpendiculares formándose con éstas, una serie de polígonos, los cuales serán el área representativa de la estación que encierran (**Gráfico 31**).

La zona de estudio es una zona inaccesible, por lo que la cantidad de estaciones en la zona es escasa, como se pudo apreciar en el apartado 3.2. Aunque la ubicación de las estaciones se encuentra fuera de la subcuenca trazada, no es un problema para este método (**Gráfico 31**).

En la **Tabla 19** se muestra el área tributaria correspondiente para cada una de las estaciones pluviométricas.

Tabla 19. Área tributaria correspondiente para cada estación pluviométrica en la subcuenca del río Paltiture.

Estación	Área trib. (Km ²)	% de área
Ichuña	376.75	31%
Lagunillas	534.27	45%
Crucero Alto	286.10	24%
Área Total	1 197.12	100%

Fuente: Elaboración propia.

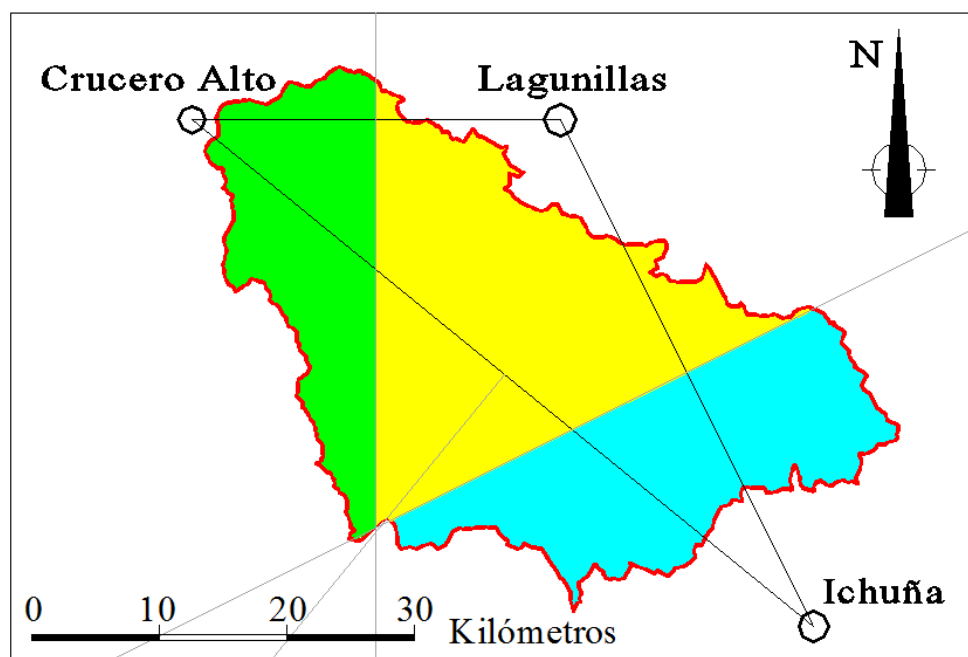


Gráfico 31. Definición de las áreas tributarias por el método de Thiessen.

Fuente: Elaboración propia – Autocad.

Para calcular la precipitación promedio mensual en la subcuenca del río Paltiture, se ponderó los promedios mensuales de cada estación con su porcentaje de área correspondiente (**Tabla 20**). La precipitación media anual en la subcuenca del río Paltiture es de 578.4 mm.

Tabla 20. Precipitación promedio mensual en mm y precipitación media anual en la subcuenca del río Paltiture.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	93.4	107.8	93.2	18.6	0.0	0.0	0.0	0.2	5.9	6.6	36.2	82.7	444.5
1996	128.2	110.5	59.9	42.4	13.2	0.0	0.0	26.4	2.7	4.7	40.9	77.1	506.0
1997	157.3	195.7	56.6	29.2	6.2	0.0	0.0	24.7	39.9	10.7	55.6	55.2	631.1
1998	182.4	79.9	93.8	14.4	0.0	3.2	0.0	0.6	0.4	12.7	68.5	33.5	489.3
1999	143.6	182.5	189.5	70.5	7.6	0.0	0.0	5.1	2.6	52.1	2.2	67.9	723.6
2000	168.0	168.7	110.4	11.8	7.3	1.0	0.0	2.4	0.0	24.3	14.2	118.6	626.7
2001	212.2	182.0	111.6	54.3	5.0	0.8	1.9	9.6	2.0	18.4	20.5	78.0	696.3
2002	130.1	171.6	139.1	60.0	11.1	1.0	21.5	2.7	3.3	38.7	64.7	112.7	756.6
2003	115.8	135.2	113.5	27.3	6.9	2.9	0.0	2.9	1.9	5.8	1.8	81.6	495.5
2004	153.3	134.1	84.4	56.2	0.0	0.0	13.3	10.4	6.9	5.0	19.4	55.6	538.6
2005	175.1	182.6	56.3	22.2	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	3.0	53.2	97.6	604.0
2006	206.8	105.2	148.2	29.7	0.1	0.0	0.0	1.3	9.4	11.2	69.9	87.8	669.6
2007	128.7	73.3	159.6	35.6	2.6	0.1	0.8	0.0	2.9	11.6	37.1	81.6	533.9
2008	199.2	80.8	59.2	0.2	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	9.3	5.8	133.7	490.3
2009	83.5	169.8	50.4	39.3	0.8	0.0	10.7	0.0	20.0	6.5	71.3	73.3	525.6
2010	169.6	165.2	47.9	46.4	9.8	0.6	0.9	0.2	1.4	9.7	6.9	63.4	522.0
Máximo	212.2	195.7	189.5	70.5	13.2	3.2	21.5	26.4	39.9	52.1	71.3	133.7	756.6
Promedio	152.9	140.3	98.3	34.9	4.4	0.6	3.1	5.5	7.1	14.4	35.5	81.3	578.4
Mínimo	83.5	73.3	47.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.8	33.5	444.5

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Temperatura

La temperatura es de gran importancia dentro del ciclo hidrológico debido a que esta variable climática se encuentra ligada a la evapotranspiración y al período vegetativo de los cultivos.

Para el estudio de esta variable se contó con las estaciones climatológicas de Ichuña, Lagunillas y Crucero Alto, las cuales cuentan con registros de temperatura media mensual desde 1995 hasta 2010 (desde la **Tabla 21** hasta la **Tabla 23**).

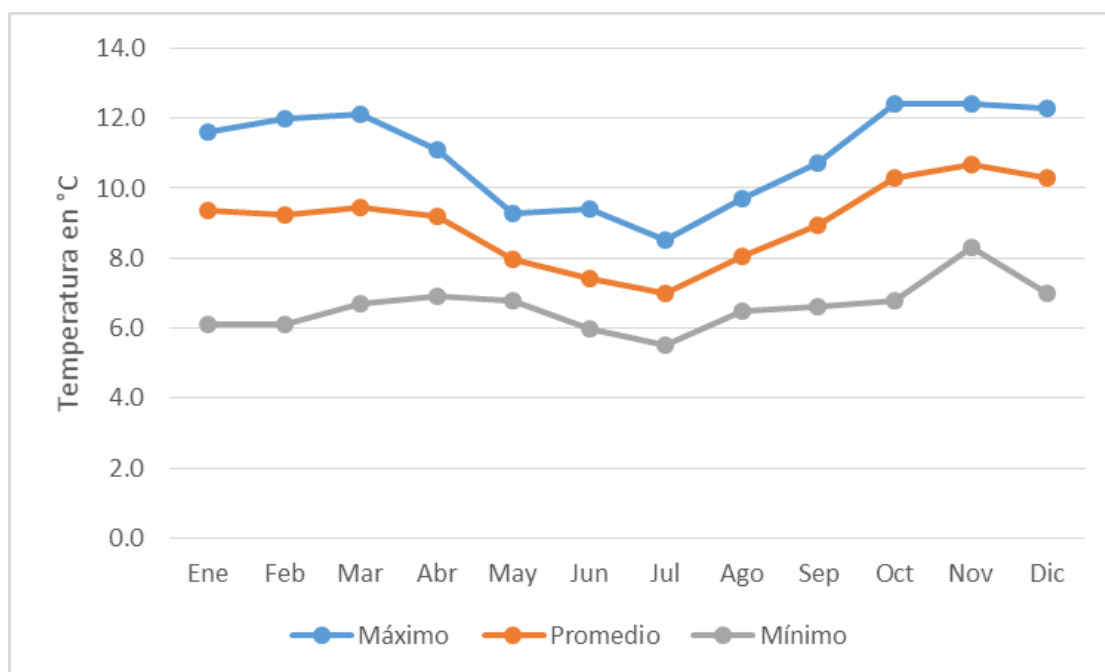
En la **Tabla 24** se muestra la temperatura total mensual y anual de la subcuenca del río Paltiture calculado utilizando polígonos de Thiessen.

La temperatura en estas estaciones oscila entre 2.6°C y 12.4°C a lo largo del año (**Gráfico 32**, **Gráfico 33** y **Gráfico 34**).

Tabla 21. Temperatura total mensual y anual (°C) – Estación Ichuña.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
1995	7.6	7.5	8.4	8.6	7.6	7.3	7.2	8.2	8.4	9.7	8.3	8.0	8.1
1996	6.9	6.7	7.2	6.9	6.8	7.3	8.5	6.5	8.1	9.5	9.1	10.0	7.8
1997	9.7	10.2	9.9	9.9	8.1	8.6	7.8	8.5	8.0	8.9	8.3	9.4	8.9
1998	7.8	7.1	6.7	6.9	7.5	7.0	6.2	7.5	6.6	6.8	8.7	8.4	7.3
1999	6.8	6.1	7.0	8.0	7.7	6.8	5.5	8.1	8.0	7.8	8.9	7.0	7.3
2000	6.1	7.1	7.8	7.7	7.4	7.3	6.1	7.2	9.2	11.0	11.5	10.2	8.2
2001	9.3	8.5	9.0	8.3	7.2	7.4	5.7	7.4	8.8	9.3	10.3	10.0	8.4
2002	9.9	9.3	9.0	8.9	7.9	7.0	7.0	7.4	8.0	10.1	11.0	10.5	8.8
2003	8.8	9.3	9.9	8.8	7.0	6.0	6.0	7.0	8.6	10.6	11.1	10.8	8.7
2004	9.7	9.0	10.0	8.9	7.4	6.6	7.8	8.3	8.8	11.3	12.0	11.8	9.3
2005	10.3	11.3	11.1	10.8	8.4	7.2	6.9	8.7	9.5	11.5	11.8	11.9	10.0
2006	11.5	11.4	10.5	10.9	9.2	8.8	7.4	9.1	10.2	11.6	11.3	11.4	10.3
2007	11.0	11.1	11.1	10.0	7.8	7.4	7.1	8.3	9.6	11.4	12.4	10.9	9.8
2008	11.6	10.8	11.0	10.5	8.8	6.6	7.3	7.9	10.2	12.4	11.7	12.3	10.1
2009	11.5	12.0	12.1	11.1	9.2	9.4	7.4	9.7	10.7	11.7	12.2	11.0	10.7
2010	11.4	10.1	10.5	10.6	9.3	8.1	7.7	9.0	10.5	11.4	12.4	11.4	10.2
Máximo	11.6	12.0	12.1	11.1	9.3	9.4	8.5	9.7	10.7	12.4	12.4	12.3	10.7
Promedio	9.4	9.2	9.5	9.2	8.0	7.4	7.0	8.1	9.0	10.3	10.7	10.3	9.0
Mínimo	6.1	6.1	6.7	6.9	6.8	6.0	5.5	6.5	6.6	6.8	8.3	7.0	7.3

Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015

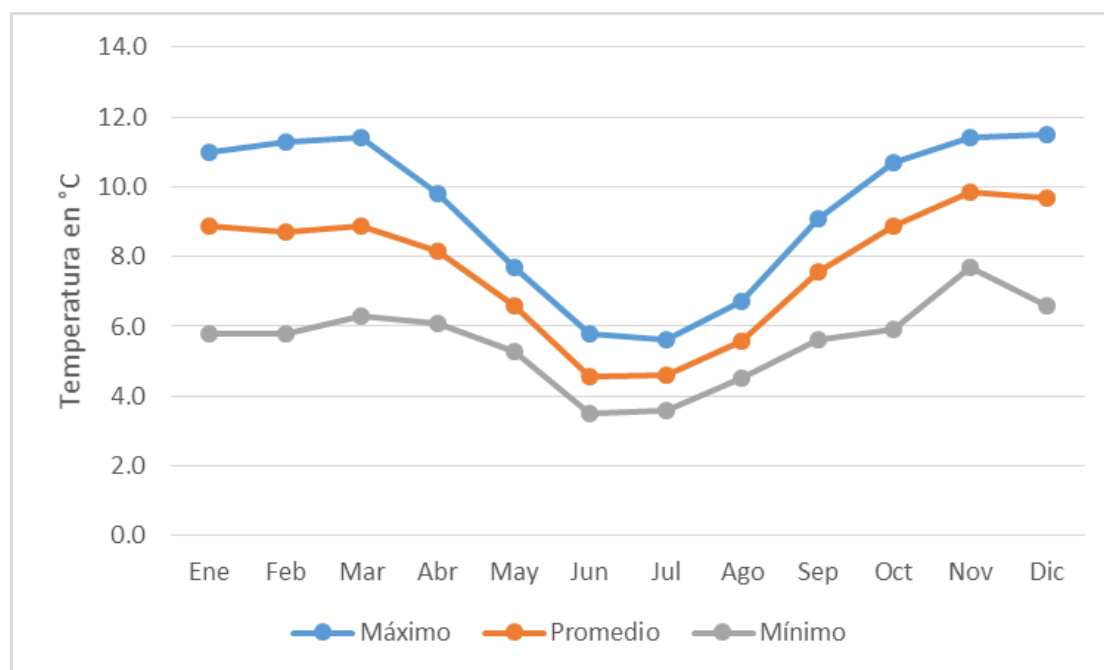
**Gráfico 32.** Variación anual de la temperatura (°C) – Estación Ichuña.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Temperatura total mensual y anual (°C) – Estación Lagunillas.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
1995	7.2	7.1	7.9	7.6	6.3	4.5	4.7	5.7	7.1	8.4	7.7	7.5	6.8
1996	6.5	6.3	6.8	6.1	5.6	4.5	5.6	4.5	6.9	8.2	8.4	9.4	6.6
1997	9.2	9.6	9.3	8.8	6.7	5.3	5.1	5.9	6.8	7.7	7.7	8.8	7.6
1998	7.4	6.7	6.3	6.1	6.2	4.3	4.1	5.2	5.6	5.9	8.0	7.9	6.1
1999	6.4	5.8	6.6	7.1	6.4	4.2	3.6	5.6	6.8	6.7	8.2	6.6	6.2
2000	5.8	6.7	7.3	6.8	6.1	4.5	4.0	5.0	7.8	9.5	10.6	9.6	7.0
2001	8.8	8.3	8.5	7.7	6.8	5.4	4.1	5.3	7.3	8.1	9.3	9.4	7.4
2002	9.0	8.8	8.2	7.6	6.1	3.5	4.4	5.0	6.7	8.9	10.9	10.9	7.5
2003	8.9	8.7	9.4	8.0	5.3	4.2	4.0	5.3	7.6	9.2	10.9	10.3	7.7
2004	8.9	8.3	9.4	7.7	6.2	3.6	4.9	5.2	7.3	9.4	9.9	9.8	7.6
2005	9.7	10.7	10.4	9.6	6.9	4.4	4.5	6.0	8.0	9.9	10.9	11.2	8.5
2006	10.9	10.8	9.9	9.7	7.6	5.4	4.9	6.3	8.6	10.0	10.4	10.7	8.8
2007	10.4	10.5	10.4	8.9	6.4	4.6	4.7	5.7	8.1	9.8	11.4	10.2	8.4
2008	11.0	10.2	10.3	9.3	7.3	4.1	4.8	5.5	8.6	10.7	10.8	11.5	8.7
2009	10.9	11.3	11.4	9.8	7.6	5.8	4.9	6.7	9.1	10.1	11.3	10.3	9.1
2010	10.8	9.5	9.9	9.4	7.7	5.0	5.1	6.2	8.9	9.8	11.4	10.7	8.7
Máximo	11.0	11.3	11.4	9.8	7.7	5.8	5.6	6.7	9.1	10.7	11.4	11.5	9.1
Promedio	8.9	8.7	8.9	8.1	6.6	4.6	4.6	5.6	7.6	8.9	9.9	9.7	7.7
Mínimo	5.8	5.8	6.3	6.1	5.3	3.5	3.6	4.5	5.6	5.9	7.7	6.6	6.1

Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015.

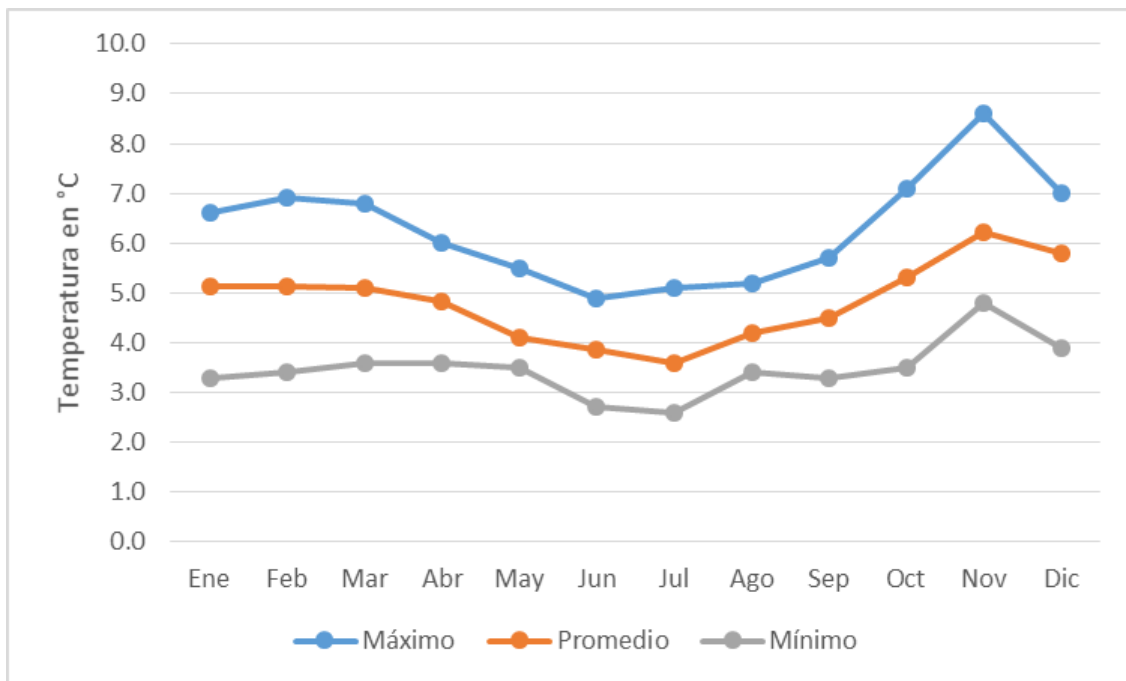
**Gráfico 33.** Variación anual de la temperatura (°C) – Estación Lagunillas.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Temperatura total mensual y anual (°C) – Estación Crucero Alto.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
1995	4.2	4.2	4.5	4.5	3.9	3.8	3.7	4.3	4.2	5.0	4.8	4.5	4.3
1996	3.8	3.7	3.9	3.6	3.5	3.8	4.4	3.4	4.1	4.9	5.3	5.6	4.2
1997	5.3	5.7	5.3	5.2	4.2	4.5	4.0	4.4	4.0	4.6	4.8	5.3	4.8
1998	4.3	3.9	3.6	3.6	3.9	3.6	3.2	3.9	3.3	3.5	5.1	4.7	3.9
1999	3.7	3.4	3.8	4.2	4.0	3.5	2.8	4.2	4.0	4.0	5.2	3.9	3.9
2000	3.3	3.9	4.2	4.1	3.8	3.8	3.1	3.7	4.6	5.7	6.7	5.7	4.4
2001	5.1	4.8	4.9	4.5	4.0	4.2	3.1	3.9	4.4	4.8	5.9	5.6	4.6
2002	5.3	5.2	4.8	4.6	3.9	3.3	3.5	3.8	4.0	5.3	6.6	6.2	4.7
2003	5.6	6.5	6.3	6.0	4.7	4.2	4.5	4.8	5.7	7.1	7.2	7.0	5.8
2004	6.5	5.9	6.3	5.8	5.5	4.9	5.1	4.9	5.0	5.4	6.1	6.1	5.6
2005	4.7	5.4	5.7	4.9	3.6	3.7	3.6	3.9	4.5	5.7	6.9	6.7	4.9
2006	6.1	5.1	5.1	5.6	3.8	4.2	3.5	4.4	4.4	4.9	5.5	6.0	4.9
2007	5.2	5.4	5.3	4.4	3.7	3.0	3.0	4.0	4.3	6.3	7.9	5.8	4.9
2008	6.1	6.3	5.2	4.9	4.0	2.7	3.1	3.6	4.6	5.5	6.3	6.5	4.9
2009	6.6	6.9	6.8	5.8	4.3	4.2	2.6	4.5	5.0	5.4	6.6	6.2	5.4
2010	6.2	5.7	5.9	5.6	4.8	4.3	4.3	5.2	5.7	7.1	8.6	6.7	5.8
Máximo	6.6	6.9	6.8	6.0	5.5	4.9	5.1	5.2	5.7	7.1	8.6	7.0	5.8
Promedio	5.1	5.1	5.1	4.8	4.1	3.9	3.6	4.2	4.5	5.3	6.2	5.8	4.8
Mínimo	3.3	3.4	3.6	3.6	3.5	2.7	2.6	3.4	3.3	3.5	4.8	3.9	3.9

Fuente: Página web de Autoridad Nacional del Agua – 12 de Marzo de 2015.

**Gráfico 34.** Variación anual de la temperatura (°C) – Estación Crucero Alto.

Fuente: Elaboración propia

Se analizó la temperatura promedio utilizando mapa de isotermas de algunos años (1995, 1999, 2003, 2007 y 2010) y de algunos meses (enero, marzo, mayo, julio, septiembre y noviembre), y se comparó con la temperatura promedio utilizando polígonos de Thiessen, obteniéndose un margen de error del 2% entre ambos métodos. Por lo tanto, ya que la diferencia no es significativa, se utilizó el método de polígonos de Thiessen para analizar los parámetros del balance hídrico superficial.

Tabla 24. Temperatura total mensual y anual (°C) – Subcuenca del río Paltiture.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
1995	6.6	6.5	7.2	7.2	6.1	5.2	5.2	6.2	6.8	8.0	7.2	6.9	6.6
1996	6.0	5.8	6.2	5.8	5.5	5.2	6.2	4.9	6.6	7.8	7.9	8.7	6.4
1997	8.4	8.9	8.5	8.3	6.5	6.1	5.7	6.4	6.5	7.3	7.2	8.2	7.3
1998	6.8	6.2	5.8	5.8	6.1	5.0	4.5	5.6	5.4	5.6	7.5	7.3	6.0
1999	5.9	5.3	6.1	6.7	6.2	4.9	4.0	6.1	6.5	6.4	7.7	6.1	6.0
2000	5.3	6.2	6.7	6.4	6.0	5.2	4.4	5.4	7.5	9.1	10.0	8.9	6.7
2001	8.1	7.5	7.8	7.1	6.3	5.7	4.4	5.6	7.1	7.7	8.8	8.7	7.1
2002	8.4	8.1	7.6	7.3	6.1	4.6	5.0	5.5	6.5	8.4	9.9	9.7	7.3
2003	8.1	8.4	8.8	7.8	5.7	4.8	4.7	5.7	7.5	9.1	10.1	9.7	7.5
2004	8.6	7.9	8.8	7.6	6.4	4.9	5.9	6.1	7.2	9.0	9.7	9.5	7.6
2005	8.7	9.6	9.5	8.9	6.6	5.1	5.0	6.3	7.6	9.4	10.2	10.3	8.1
2006	9.9	9.6	8.9	9.1	7.2	6.2	5.4	6.7	8.1	9.3	9.5	9.8	8.3
2007	9.3	9.5	9.4	8.2	6.2	5.1	5.0	6.1	7.7	9.5	10.9	9.4	8.0
2008	10.0	9.5	9.3	8.6	7.0	4.6	5.2	5.8	8.1	10.0	10.0	10.6	8.2
2009	10.1	10.5	10.5	9.3	7.3	6.6	5.1	7.1	8.6	9.5	10.5	9.5	8.7
2010	9.9	8.8	9.1	8.9	7.5	5.8	5.7	6.8	8.6	9.7	11.0	10.0	8.5
Máximo	10.1	10.5	10.5	9.3	7.5	6.6	6.2	7.1	8.6	10.0	11.0	10.6	8.7
Promedio	8.1	8.0	8.2	7.7	6.4	5.3	5.1	6.0	7.3	8.5	9.3	8.9	7.4
Mínimo	5.3	5.3	5.8	5.8	5.5	4.6	4.0	4.9	5.4	5.6	7.2	6.1	6.0

Fuente: Elaboración propia

3.5. Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual una cantidad de agua cambia de estado líquido a vapor. Para el cálculo del balance hídrico superficial, se considera la evaporación la que se produce desde una superficie libre de agua como lagos, embalses y pantanos.

En la zona de estudio, las superficies libres de agua son mínimas, por lo que la evaporación no será considerada por separado en el cálculo del balance hídrico superficial. Éste se evaluará de forma conjunta a través de la evapotranspiración, proceso que se estudia a continuación.

3.6. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por la transpiración de la vegetación. Es

la suma de la cantidad de agua que pasa a la atmósfera por los procesos de evaporación del agua interceptada por el suelo y de la transpiración de las plantas (UNESCO, 1982).

Existen dos tipos de superficies de terreno, una natural y otra de riego, por lo que el cálculo de la evapotranspiración dependerá del tipo de superficie que se tenga.

Una superficie natural se identifica cuando la superficie regada es muy pequeña en relación al área total. Dentro de la subcuenca se tiene un total de 6.7 km² de área verde que, con respecto al total del área de la subcuenca, equivaldría al 0.55%. Por lo tanto, la subcuenca del río Paltiture es una superficie natural.

Para calcular la evapotranspiración en la subcuenca del río Paltiture, se utilizó el método de Thornthwaite el cual consiste en calcular para cada mes la evapotranspiración potencial¹⁰ y a partir de su suma, calcular el valor anual. Tiene la ventaja de utilizar en sus cálculos dos factores, la temperatura media mensual y la latitud, que implícitamente introduce la duración teórica de la insolación; y tiene como desventaja no tomar en cuenta la humedad del aire.

Para hallar la evapotranspiración potencial, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$ETP = 16F * \left(10 \frac{T}{I}\right)^A$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración (mm/mes)

F = Factor de corrección por latitud y duración del mes

T = Temperatura media mensual (°C)

I = Índice térmico anual

A = Exponente en función de la temperatura

Para el cálculo del factor de corrección (F), será necesario saber el número de horas de sol teóricas (N) para cada mes dependiendo de la latitud en la que se encuentra la estación. El factor de corrección tiene la siguiente expresión:

$$F = \frac{N}{12} * \frac{d}{30}$$

Donde:

N = Número de horas de sol teóricas (**Tabla 29**, latitud 16°S).

d = Número de días que tiene el mes analizado

La **Tabla 25** muestra el cálculo del factor de corrección mensual para la zona de estudio.

Tabla 25. Cálculo del factor de corrección (F) mensual para la subcuenca del río Paltiture.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
N	12.9	12.5	12.1	11.6	11.3	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9
d	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
F	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1

Fuente: Elaboración propia.

¹⁰ Evapotranspiración potencial: Cantidad de agua que si estuviera disponible, sería evapotranspirada desde una superficie dada (UNESCO, 1982).

El cálculo del índice térmico anual (I) se realiza aplicando la siguiente expresión:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \rightarrow \text{Siendo } T_i \text{ la temperatura mensual.}$$

De la **Tabla 26** a la **Tabla 28** se muestra el cálculo del índice térmico anual, correspondientes a las estaciones Ichuña, Lagunillas y Crucero Alto respectivamente.

Tabla 26. Cálculo del índice térmico anual (I) – Estación Ichuña.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	I
1995	1.9	1.8	2.2	2.3	1.9	1.8	1.7	2.1	2.2	2.7	2.2	2.0	24.8
1996	1.6	1.6	1.7	1.6	1.6	1.8	2.2	1.5	2.1	2.6	2.5	2.9	23.7
1997	2.7	2.9	2.8	2.8	2.1	2.3	2.0	2.2	2.0	2.4	2.2	2.6	29.0
1998	2.0	1.7	1.6	1.6	1.8	1.7	1.4	1.8	1.5	1.6	2.3	2.2	21.2
1999	1.6	1.4	1.7	2.0	1.9	1.6	1.2	2.1	2.0	2.0	2.4	1.7	21.4
2000	1.4	1.7	2.0	1.9	1.8	1.8	1.4	1.7	2.5	3.3	3.5	2.9	25.9
2001	2.6	2.2	2.4	2.2	1.7	1.8	1.2	1.8	2.4	2.6	3.0	2.9	26.7
2002	2.8	2.6	2.4	2.4	2.0	1.7	1.7	1.8	2.0	2.9	3.3	3.1	28.6
2003	2.4	2.6	2.8	2.4	1.7	1.3	1.3	1.7	2.3	3.1	3.3	3.2	28.0
2004	2.7	2.4	2.9	2.4	1.8	1.5	2.0	2.2	2.4	3.4	3.8	3.7	31.1
2005	3.0	3.4	3.3	3.2	2.2	1.7	1.6	2.3	2.6	3.5	3.7	3.7	34.4
2006	3.5	3.5	3.1	3.3	2.5	2.4	1.8	2.5	2.9	3.6	3.4	3.5	35.9
2007	3.3	3.3	3.3	2.9	2.0	1.8	1.7	2.2	2.7	3.5	4.0	3.3	33.8
2008	3.6	3.2	3.3	3.1	2.4	1.5	1.8	2.0	2.9	4.0	3.6	3.9	35.2
2009	3.5	3.8	3.8	3.3	2.5	2.6	1.8	2.7	3.2	3.6	3.9	3.3	38.1
2010	3.5	2.9	3.1	3.1	2.6	2.1	1.9	2.4	3.1	3.5	4.0	3.5	35.6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Cálculo del índice térmico anual (I) – Estación Lagunillas.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	I
1995	1.7	1.7	2.0	1.9	1.4	0.9	0.9	1.2	1.7	2.2	1.9	1.8	19.4
1996	1.5	1.4	1.6	1.4	1.2	0.9	1.2	0.9	1.6	2.1	2.2	2.6	18.5
1997	2.5	2.7	2.6	2.4	1.6	1.1	1.0	1.3	1.6	1.9	1.9	2.4	22.9
1998	1.8	1.6	1.4	1.4	1.4	0.8	0.7	1.1	1.2	1.3	2.0	2.0	16.6
1999	1.5	1.3	1.5	1.7	1.5	0.8	0.6	1.2	1.6	1.6	2.1	1.5	16.7
2000	1.3	1.6	1.8	1.6	1.4	0.9	0.7	1.0	2.0	2.6	3.1	2.7	20.5
2001	2.4	2.2	2.2	1.9	1.6	1.1	0.7	1.1	1.8	2.1	2.6	2.6	22.2
2002	2.4	2.4	2.1	1.9	1.4	0.6	0.8	1.0	1.6	2.4	3.3	3.3	23.0
2003	2.4	2.3	2.6	2.0	1.1	0.8	0.7	1.1	1.9	2.5	3.3	3.0	23.7
2004	2.4	2.2	2.6	1.9	1.4	0.6	1.0	1.1	1.8	2.6	2.8	2.8	23.1
2005	2.7	3.2	3.0	2.7	1.6	0.8	0.9	1.3	2.0	2.8	3.3	3.4	27.7
2006	3.3	3.2	2.8	2.7	1.9	1.1	1.0	1.4	2.3	2.9	3.0	3.2	28.7
2007	3.0	3.1	3.0	2.4	1.5	0.9	0.9	1.2	2.1	2.8	3.5	2.9	27.3
2008	3.3	2.9	3.0	2.6	1.8	0.7	0.9	1.2	2.3	3.2	3.2	3.5	28.6
2009	3.3	3.4	3.5	2.8	1.9	1.3	1.0	1.6	2.5	2.9	3.4	3.0	30.4
2010	3.2	2.6	2.8	2.6	1.9	1.0	1.0	1.4	2.4	2.8	3.5	3.2	28.4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Cálculo del índice térmico anual (I) – Estación Crucero Alto.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	I
1995	0.8	0.8	0.9	0.9	0.7	0.7	0.6	0.8	0.8	1.0	0.9	0.9	9.6
1996	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	0.6	0.7	1.0	1.1	1.2	9.2
1997	1.1	1.2	1.1	1.1	0.8	0.9	0.7	0.8	0.7	0.9	0.9	1.1	11.2
1998	0.8	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.5	0.7	0.5	0.6	1.0	0.9	8.2
1999	0.6	0.6	0.7	0.8	0.7	0.6	0.4	0.8	0.7	0.7	1.1	0.7	8.3
2000	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.5	0.6	0.9	1.2	1.6	1.2	10.0
2001	1.0	0.9	1.0	0.9	0.7	0.8	0.5	0.7	0.8	0.9	1.3	1.2	10.7
2002	1.1	1.1	0.9	0.9	0.7	0.5	0.6	0.7	0.7	1.1	1.5	1.4	11.2
2003	1.2	1.5	1.4	1.3	0.9	0.8	0.9	0.9	1.2	1.7	1.7	1.7	15.2
2004	1.5	1.3	1.4	1.3	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.4	1.4	14.4
2005	0.9	1.1	1.2	1.0	0.6	0.6	0.6	0.7	0.9	1.2	1.6	1.6	12.0
2006	1.4	1.0	1.0	1.2	0.7	0.8	0.6	0.8	0.8	1.0	1.2	1.3	11.7
2007	1.1	1.1	1.1	0.8	0.6	0.5	0.5	0.7	0.8	1.4	2.0	1.3	11.8
2008	1.4	1.4	1.1	1.0	0.7	0.4	0.5	0.6	0.9	1.2	1.4	1.5	11.9
2009	1.5	1.6	1.6	1.3	0.8	0.8	0.4	0.9	1.0	1.1	1.5	1.4	13.8
2010	1.4	1.2	1.3	1.2	0.9	0.8	0.8	1.1	1.2	1.7	2.3	1.6	15.4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Número de horas de sol teóricas (N) en el hemisferio norte y sur.

Northern Hemisphere												Lat.	Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	dég.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.0	6.6	11.0	15.6	21.3	24.0	24.0	17.6	12.8	8.3	2.3	0.0	70	24.0	17.4	13.0	8.4	2.7	0.0	0.0	6.4	11.2	15.7	21.7	24.0
2.1	7.3	11.1	15.3	19.7	24.0	22.3	17.0	12.7	8.7	4.1	0.0	68	21.9	16.7	12.9	8.7	4.3	0.0	1.7	7.0	11.3	15.3	19.9	24.0
3.9	7.8	11.2	14.9	18.7	22.0	20.3	16.4	12.7	9.0	5.2	1.9	66	20.1	16.2	12.8	9.1	5.3	2.0	3.7	7.6	11.3	15.0	18.8	22.1
5.0	8.2	11.2	14.7	17.9	20.3	19.2	16.0	12.6	9.3	6.0	3.7	64	19.0	15.8	12.8	9.3	6.1	3.7	4.8	8.0	11.4	14.7	18.0	20.3
5.7	8.5	11.3	14.4	17.3	19.2	18.4	15.7	12.6	9.5	6.6	4.8	62	18.3	15.5	12.7	9.6	6.7	4.8	5.6	8.3	11.4	14.5	17.4	19.2
6.4	8.8	11.4	14.2	16.8	18.4	17.7	15.3	12.5	9.7	7.1	5.6	60	17.6	15.2	12.6	9.8	7.2	5.6	6.3	8.7	11.5	14.3	16.9	18.4
6.9	9.1	11.4	14.1	16.4	17.8	17.2	15.1	12.5	9.9	7.5	6.2	58	17.1	14.9	12.6	9.9	7.6	6.2	6.8	8.9	11.5	14.1	16.5	17.8
7.3	9.3	11.5	13.9	16.0	17.3	16.8	14.8	12.4	10.1	7.9	6.7	56	16.7	14.7	12.5	10.1	8.0	6.7	7.2	9.2	11.6	13.9	16.1	17.3
7.7	9.5	11.5	13.8	15.7	16.8	16.4	14.6	12.4	10.2	8.2	7.1	54	16.3	14.5	12.5	10.2	8.3	7.2	7.6	9.4	11.6	13.8	15.8	16.9
8.0	9.7	11.5	13.6	15.4	16.5	16.0	14.4	12.4	10.3	8.5	7.5	52	16.0	14.3	12.5	10.4	8.6	7.5	8.0	9.6	11.6	13.7	15.5	16.5
8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9	50	15.7	14.2	12.4	10.5	8.8	7.9	8.3	9.7	11.7	13.6	15.3	16.1
8.6	10.0	11.6	13.4	15.0	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9.0	8.2	48	15.4	14.0	12.4	10.6	9.0	8.2	8.5	9.9	11.7	13.4	15.0	15.8
8.8	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14.0	12.3	10.7	9.2	8.5	46	15.2	13.9	12.4	10.7	9.2	8.5	8.8	10.0	11.7	13.3	14.8	15.5
9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15.0	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7	44	14.9	13.7	12.4	10.8	9.4	8.7	9.0	10.2	11.7	13.3	14.6	15.3
9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15.0	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9.0	42	14.7	13.6	12.3	10.8	9.6	9.0	9.2	10.3	11.7	13.2	14.4	15.0
9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2	40	14.5	13.5	12.3	10.9	9.8	9.2	9.4	10.4	11.8	13.1	14.3	14.8
9.6	10.6	11.7	13.0	14.1	14.6	14.4	13.5	12.2	11.0	9.9	9.4	38	14.4	13.4	12.3	11.0	9.9	9.4	9.6	10.5	11.8	13.0	14.1	14.6
9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6	36	14.2	13.3	12.3	11.1	10.1	9.6	9.8	10.6	11.8	12.9	13.9	14.4
10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.2	9.7	34	14.0	13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	9.9	10.7	11.8	12.9	13.8	14.3
10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9	32	13.9	13.1	12.2	11.2	10.4	9.9	10.1	10.8	11.8	12.8	13.7	14.1
10.3	11.0	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1	30	13.7	13.0	12.2	11.3	10.5	10.1	10.2	10.9	11.8	12.7	13.5	13.9
10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	28	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8
10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4	26	13.5	12.9	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.9	12.6	13.3	13.6
10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5	24	13.3	12.8	12.2	11.4	10.8	10.5	10.7	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5
10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.8	12.1	11.5	10.9	10.7	22	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.2	11.9	12.5	13.1	13.3
10.9	11.3	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	10.8	20	13.1	12.7	12.1	11.5	11.1	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2
11.0	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9	18	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	10.9	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1
11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1	16	12.9	12.5	12.1	11.6	11.3	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9
11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2	14	12.7	12.4	12.1	11.7	11.4	11.2	11.2	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8
11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	12	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7
11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	10	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6
11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.0	11.8	11.6	11.5	8	12.4	12.3	12.1	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	12.0	12.2	12.4	12.5
11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	6	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3
11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	4	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2
11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	2	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1
12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

¹ Values for N on the 15th day of the month provide a good estimate (error < 1 %) of N averaged over all days within the month. Only for high latitudes greater than 55° (N or S) during winter months deviations may be more than 1%.

Fuente: Página web de FAO Corporate Document Repository, 05 de Mayo de 2015.

Para el cálculo del exponente en función de la temperatura (A), se aplica la siguiente expresión en función del índice térmico anual:

$$A = 6.75 * 10^{-7} * I^3 - 7.71 * 10^{-5} * I^2 + 0.01792 * I + 0.4924$$

La **Tabla 30** muestra el resultado de calcular el exponente en función de la temperatura (A), habiendo calculado el índice térmico anteriormente.

Tabla 30. Cálculo del exponente “A” en función de la temperatura anual para las estaciones de Ichuña, Lagunillas y Crucero Alto.

Año	E. Ichuña		E. Lagunillas		E. Crucero Alto	
	I	A	I	A	I	A
1995	24.8	0.9	19.4	0.8	9.6	0.7
1996	23.7	0.9	18.5	0.8	9.2	0.7
1997	29.0	1.0	22.9	0.9	11.2	0.7
1998	21.2	0.8	16.6	0.8	8.2	0.6
1999	21.4	0.8	16.7	0.8	8.3	0.6
2000	25.9	0.9	20.5	0.8	10.0	0.7
2001	26.7	0.9	22.2	0.9	10.7	0.7
2002	28.6	1.0	23.0	0.9	11.2	0.7
2003	28.0	0.9	23.7	0.9	15.2	0.7
2004	31.1	1.0	23.1	0.9	14.4	0.7
2005	34.4	1.0	27.7	0.9	12.0	0.7
2006	35.9	1.1	28.7	1.0	11.7	0.7
2007	33.8	1.0	27.3	0.9	11.8	0.7
2008	35.2	1.1	28.6	1.0	11.9	0.7
2009	38.1	1.1	30.4	1.0	13.8	0.7
2010	35.6	1.1	28.4	1.0	15.4	0.8

Fuente: Elaboración propia.

Habiendo calculado los factores de corrección mensual F (**Tabla 25**), así como los parámetros I y A anuales para cada estación (**Tabla 30**), se procede según el método de Thornthwaite, a calcular la ETP mensual para cada estación de la subcuenca del río Paltiture (**Tabla 31**, **Tabla 32** y **Tabla 33**) y la ETP mensual para la subcuenca del río Paltiture (**Tabla 34**) utilizando polígonos de Thiessen.

Tabla 31. Evapotranspiración potencial mensual en mm – método de Thornthwaite – Estación Ichuña.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	48.7	42.1	49.9	47.3	42.6	39.1	39.9	46.5	47.5	58.3	50.6	51.0	563.4
1996	45.7	38.9	44.5	39.7	39.5	40.0	47.2	38.6	47.0	58.2	56.0	63.4	558.6
1997	56.9	52.3	54.4	50.5	41.9	42.2	39.7	44.6	42.2	50.3	47.0	55.2	577.1
1998	53.4	43.1	44.0	41.9	45.2	40.6	37.8	46.0	41.4	45.7	56.2	56.8	552.0
1999	47.3	37.7	45.5	47.2	46.0	39.4	34.0	48.9	48.4	51.1	57.0	48.5	551.0
2000	39.0	39.2	45.8	42.0	40.8	38.3	33.5	40.4	50.7	64.3	66.9	62.4	563.3
2001	56.6	45.6	51.5	44.3	39.1	38.1	30.9	40.8	48.0	54.4	59.8	60.6	569.9
2002	58.3	48.1	49.9	45.8	41.2	34.8	36.0	39.3	42.5	57.2	62.0	61.7	576.8
2003	52.7	48.6	55.2	45.8	37.1	30.5	31.5	37.8	46.0	60.4	63.0	64.0	572.7
2004	55.2	44.8	53.3	44.1	36.9	31.3	38.2	42.1	44.7	61.7	65.5	67.0	584.9
2005	55.9	53.9	56.7	51.1	39.6	32.0	31.7	41.8	45.9	60.3	61.9	65.0	595.8
2006	61.6	53.4	52.4	50.6	42.5	38.5	33.1	42.7	48.4	59.7	58.0	61.0	601.9
2007	60.3	53.3	57.1	47.6	37.0	33.3	33.0	40.2	46.8	60.2	65.6	59.8	594.0
2008	62.7	50.9	55.6	49.1	41.0	28.7	33.0	37.2	48.8	64.6	60.7	66.7	599.1
2009	60.0	55.0	59.5	50.2	41.1	40.0	31.8	44.3	49.5	58.8	61.5	57.1	608.8
2010	61.3	47.2	52.7	49.4	43.2	35.5	34.8	42.5	50.1	58.9	64.3	61.3	601.1
Máximo	62.7	55.0	59.5	51.1	46.0	42.2	47.2	48.9	50.7	64.6	66.9	67.0	608.8
Promedio	54.7	47.1	51.8	46.7	40.9	36.4	35.4	42.1	46.7	57.8	59.8	60.1	579.4
Mínimo	39.0	37.7	44.0	39.7	36.9	28.7	30.9	37.2	41.4	45.7	47.0	48.5	551.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Evapotranspiración potencial mensual en mm – método de Thornthwaite – Estación Lagunillas.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	51.8	44.9	52.4	47.1	40.7	29.4	31.5	38.2	45.7	56.5	52.6	53.6	544.5
1996	48.7	41.6	47.4	40.3	37.9	30.2	37.2	32.3	45.6	56.4	57.5	65.5	540.6
1997	59.7	54.2	56.5	49.9	39.7	30.7	30.7	36.1	40.9	49.1	49.1	57.4	554.1
1998	56.3	45.6	46.6	42.2	43.0	30.8	30.7	38.2	40.5	45.4	57.4	59.2	536.0
1999	50.2	40.7	48.2	47.3	44.0	30.2	27.7	40.4	47.0	50.0	58.4	51.4	535.3
2000	42.3	41.7	48.0	42.0	38.6	28.5	26.7	33.3	48.3	61.3	67.1	64.3	542.2
2001	58.0	48.3	52.8	45.0	40.7	31.8	25.9	33.5	44.1	52.0	58.5	61.4	552.1
2002	58.4	50.1	50.5	43.9	36.4	21.3	26.9	31.2	40.3	55.6	66.3	69.0	549.9
2003	57.2	49.1	56.3	45.3	31.7	24.6	24.3	32.3	44.4	56.6	65.7	65.1	552.5
2004	57.8	47.6	56.9	44.3	36.9	21.8	29.5	32.2	43.4	58.3	60.9	62.9	552.5
2005	58.0	55.7	58.1	50.0	36.8	22.9	24.2	32.8	43.2	56.8	62.2	66.4	567.1
2006	63.9	55.4	54.7	49.7	39.6	27.1	25.5	33.7	45.4	56.6	58.7	62.8	573.1
2007	62.3	55.1	58.5	46.9	34.6	24.2	25.5	31.6	44.0	56.7	65.2	61.2	565.8
2008	64.6	52.6	56.9	47.9	38.2	20.9	25.1	29.7	45.6	60.5	60.9	67.4	570.2
2009	62.5	56.7	61.3	49.0	38.4	28.0	24.5	34.5	46.7	55.7	62.2	59.1	578.5
2010	63.6	49.2	54.9	48.5	40.3	25.4	26.7	33.4	47.2	55.7	64.3	63.0	572.3
Máximo	64.6	56.7	61.3	50.0	44.0	31.8	37.2	40.4	48.3	61.3	67.1	69.0	578.5
Promedio	57.2	49.3	53.7	46.2	38.6	26.7	27.7	34.0	44.5	55.2	60.4	61.9	555.4
Mínimo	42.3	40.7	46.6	40.3	31.7	20.9	24.2	29.7	40.3	45.4	49.1	51.4	535.3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Evapotranspiración potencial mensual en mm – método de Thornthwaite – Estación Crucero Alto.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	47.0	41.1	46.1	42.8	39.2	36.6	37.2	42.5	41.9	50.6	49.3	49.2	523.5
1996	44.8	38.5	42.7	37.6	37.2	37.3	42.4	37.1	42.0	50.8	53.4	57.6	521.2
1997	51.4	47.3	48.2	44.2	38.4	38.3	36.5	40.3	37.8	44.8	46.1	51.4	524.7
1998	50.8	41.7	42.5	39.4	41.8	37.7	36.2	42.5	38.3	42.8	54.3	53.7	521.8
1999	46.1	38.2	43.9	43.4	42.4	37.0	33.2	44.5	43.2	46.5	54.9	47.6	521.1
2000	39.2	38.4	43.2	39.4	37.7	35.9	32.4	37.7	43.7	54.2	60.3	56.4	518.5
2001	51.1	42.9	46.7	40.9	38.0	37.3	31.4	38.0	41.3	47.2	54.2	54.5	523.5
2002	51.6	44.6	45.2	40.7	36.6	31.1	33.4	36.6	38.0	49.6	57.5	57.4	522.4
2003	47.2	46.2	48.4	43.3	36.3	31.7	34.5	37.5	42.7	54.2	54.7	55.8	532.5
2004	53.9	44.0	49.4	43.2	41.8	36.5	38.8	39.1	39.7	45.2	49.4	51.5	532.4
2005	46.0	44.4	49.4	41.2	33.5	32.4	32.9	36.0	39.9	50.6	57.8	59.0	523.1
2006	55.8	43.1	46.2	45.7	35.2	35.9	32.7	39.7	39.7	46.1	49.9	55.1	525.0
2007	49.7	44.7	47.2	38.5	34.4	28.2	29.2	36.9	38.9	54.6	63.8	53.6	519.8
2008	55.3	49.5	46.4	41.3	36.1	26.1	29.7	34.2	40.6	49.5	54.4	57.8	521.1
2009	55.4	50.1	53.1	43.9	35.5	33.2	24.2	37.4	40.4	46.0	53.2	52.9	525.5
2010	50.7	41.6	45.8	40.8	36.6	32.0	33.1	39.6	42.5	53.9	62.2	53.7	532.6
Máximo	55.8	50.1	53.1	45.7	42.4	38.3	42.4	44.5	43.7	54.6	63.8	59.0	532.6
Promedio	49.7	43.5	46.5	41.7	37.5	34.2	33.6	38.7	40.7	49.2	54.7	54.2	524.3
Mínimo	39.2	38.2	42.5	37.6	33.5	26.1	24.2	34.2	37.8	42.8	46.1	47.6	518.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Evapotranspiración potencial mensual en mm en la subcuenca del río Paltiture – método de Thornthwaite.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	49.7	43.1	50.1	46.2	41.0	34.2	35.5	41.8	45.4	55.7	51.2	51.7	545.4
1996	46.8	40.0	45.3	39.5	38.2	35.0	41.6	35.5	45.2	55.6	56.0	62.9	541.6
1997	56.8	51.9	53.9	48.7	40.1	36.1	34.9	39.8	40.6	48.5	47.7	55.3	554.3
1998	54.0	43.9	44.8	41.4	43.4	35.5	34.3	41.7	40.3	44.9	56.3	57.1	537.7
1999	48.3	39.2	46.3	46.4	44.2	34.7	31.0	44.0	46.5	49.5	57.1	49.6	536.8
2000	40.5	40.1	46.2	41.4	39.1	33.3	30.2	36.6	48.0	60.6	65.4	61.8	543.2
2001	55.9	46.2	51.0	43.8	39.6	35.1	28.8	36.9	44.7	51.6	57.8	59.5	550.9
2002	56.7	48.2	49.1	43.7	38.0	27.9	31.3	35.1	40.4	54.6	62.8	63.9	551.8
2003	53.4	48.2	54.1	45.0	34.5	28.1	29.0	35.3	44.5	57.2	62.2	62.5	554.1
2004	56.0	45.8	54.0	44.0	38.1	28.3	34.5	37.0	42.9	56.2	59.6	61.5	557.9
2005	54.5	52.4	55.6	48.3	36.9	28.0	28.6	36.4	43.2	56.4	61.0	64.2	565.6
2006	61.2	51.8	51.9	49.0	39.5	32.8	29.6	38.0	45.0	55.0	56.4	60.4	570.7
2007	58.7	52.0	55.4	45.1	35.3	28.0	28.7	35.6	43.7	57.3	65.0	58.9	563.7
2008	61.8	51.3	54.0	46.7	38.6	24.6	28.7	33.1	45.4	59.2	59.3	64.9	567.6
2009	60.0	54.6	58.8	48.2	38.6	33.0	26.7	38.3	46.1	54.4	59.8	57.0	575.4
2010	59.8	46.8	52.0	46.9	40.4	30.2	30.8	37.7	47.0	56.3	63.8	60.3	571.9
Máximo	61.8	54.6	58.8	49.0	44.2	36.1	41.6	44.0	48.0	60.6	65.4	64.9	575.4
Promedio	54.6	47.2	51.4	45.3	39.1	31.6	31.5	37.7	44.3	54.6	58.8	59.5	555.5
Mínimo	40.5	39.2	44.8	39.5	34.5	24.6	26.7	33.1	40.3	44.9	47.7	49.6	536.8

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener la evapotranspiración real (ETR), se establecen ciertas hipótesis basadas en efectuar el balance mes a mes.

Las hipótesis son:

- a) Se compara cada valor mensual de la precipitación (**Tabla 20**) con la ETP (**Tabla 34**). Si la precipitación mensual es superior a la ETP mensual, entonces:

$$ETR = ETP$$

La diferencia “P - ETR” se acumularía como reserva de humedad, ΔH , en el suelo para cada mes.

- b) La reserva de agua en el suelo se determina como la diferencia de la P y la ETR y se acumula con la reserva del mes anterior, si la hubiera. En ningún caso ésta será menor a cero. El excedente ΔH se almacena como humedad del suelo aumentando ésta hasta la saturación del suelo, que Thornthwaite consideró 100 mm. El excedente de los 100 mm, está disponible para el escurrimiento y alimentación subterránea, más no para evapotranspiración (**Tabla 35**).

- c) Si la precipitación mensual es inferior a la ETP, la ETR se producirá tomando la precipitación más la reserva del suelo. La expresión quedaría como:

$$ETR = \min(ETP, P + \Delta H)$$

La suma de las ETR mensuales determinadas será la ETR anual (**Tabla 36**) encontrándose que la ETR promedio multianual es de 343.1 mm.

Tabla 35. Reserva de humedad, ΔH , para el cálculo de la ETR mensual en mm de la subcuenca del río Paltiture.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	43.7	100.0	100.0	15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	275.2
1996	100.0	100.0	85.0	17.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	302.6
1997	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9	307.9
1998	100.0	100.0	84.9	21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	306.7
1999	71.7	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	371.7
2000	100.0	100.0	100.0	34.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	340.1
2001	100.0	100.0	100.0	71.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	371.1
2002	91.8	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.6	442.4
2003	100.0	100.0	100.0	41.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	341.7
2004	100.0	100.0	100.0	42.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	342.7
2005	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.5	325.5
2006	100.0	100.0	100.0	76.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.9	417.8
2007	97.4	91.3	100.0	94.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	383.4
2008	100.0	100.0	34.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.3	250.0
2009	92.3	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.7	320.0
2010	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	300.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. ETR en mm de la subcuenca del río Paltiture – método Thornthwaite.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	49.7	43.1	50.1	46.2	15.5	0.0	0.0	0.2	5.9	6.6	36.2	51.7	305.1
1996	46.8	40.0	45.3	39.5	30.7	0.0	0.0	26.4	2.7	4.7	40.9	62.9	340.0
1997	56.8	51.9	53.9	48.7	6.2	0.0	0.0	24.7	39.9	10.7	47.7	55.2	395.8
1998	54.0	43.9	44.8	41.4	21.9	3.2	0.0	0.6	0.4	12.7	56.3	33.5	312.7
1999	48.3	39.2	46.3	46.4	44.2	0.0	0.0	5.1	2.6	49.5	2.2	49.6	333.3
2000	40.5	40.1	46.2	41.4	39.1	1.0	0.0	2.4	0.0	24.3	14.2	61.8	311.1
2001	55.9	46.2	51.0	43.8	39.6	0.8	1.9	9.6	2.0	18.4	20.5	59.5	349.2
2002	56.7	48.2	49.1	43.7	38.0	1.0	21.5	2.7	3.3	38.7	62.8	63.9	429.8
2003	53.4	48.2	54.1	45.0	34.5	2.9	0.0	2.9	1.9	5.8	1.8	62.5	313.0
2004	56.0	45.8	54.0	44.0	38.1	0.0	13.3	10.4	6.9	5.0	19.4	55.6	348.5
2005	54.5	52.4	55.6	48.3	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	3.0	53.2	64.2	345.2
2006	61.2	51.8	51.9	49.0	39.5	0.0	0.0	1.3	9.4	11.2	56.4	60.4	392.2
2007	58.7	52.0	55.4	45.1	35.3	0.1	0.8	0.0	2.9	11.6	37.1	58.9	358.0
2008	61.8	51.3	54.0	34.8	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	9.3	5.8	64.9	284.1
2009	60.0	54.6	58.8	48.2	0.8	0.0	10.7	0.0	20.0	6.5	59.8	57.0	376.4
2010	59.8	46.8	52.0	46.9	9.8	0.6	0.9	0.2	1.4	9.7	6.9	60.3	295.3
Máximo	61.8	54.6	58.8	49.0	44.2	3.2	21.5	26.4	39.9	49.5	62.8	64.9	429.8
Promedio	54.6	47.2	51.4	44.5	24.6	0.6	3.1	5.5	7.1	14.2	32.6	57.6	343.1
Mínimo	40.5	39.2	44.8	34.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.8	33.5	284.1

Fuente: Elaboración propia.

En el **Gráfico 35** se muestra la variación de la ETR a lo largo del año hidrológico, notándose que es mayor entre Noviembre y Abril, y siendo mínima entre los meses de Junio y Septiembre.

**Gráfico 35.** Evapotranspiración real mensual en mm – método Thornthwaite.

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4

Balance hídrico superficial

El balance hídrico es un método de investigación del ciclo hidrológico, que analiza el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan y salen del sistema en un intervalo de tiempo determinado. Se basa en la ecuación de conservación de masa (UNESCO, 1982):

$$\textit{Situación final} = \textit{situación inicial} + \textit{entradas} - \textit{salidas}$$

Teóricamente, la precipitación es fácil de medir puntualmente, pero por problemas de contorno o delimitación de la cuenca, el agua captada por los instrumentos es diferente a la que realmente cae sobre el suelo de ese lugar. Por otro lado la variación espacial de la precipitación entre dos lugares cercanos, especialmente los ubicados en zonas montañosas, puede ser grande. A esto se suma el hecho de que en la zona, como en el resto de América del Sur, la densidad de la red pluviométrica es baja y el efecto orográfico esta poco estudiado. Por todo esto, el cálculo de la precipitación media de una zona extensa empleando cualquiera de los métodos existentes está afectada de un error mayor que el de la escorrentía.

La evapotranspiración es el componente más difícil de determinar directamente. Su cálculo se efectúa por medio de fórmulas que involucran error, además del que se incluye con el uso de los parámetros necesarios para dichas formulas. El poco conocimiento del tipo y la densidad de la cubierta vegetal presente en la zona de estudio aumentan el margen de error para el cálculo de este parámetro.

La ecuación a utilizar para el balance hídrico superficial en el que se cuenta con todos los parámetros involucrados, es la siguiente:

$$P = R + ETR + \mu$$

Donde:

P: Precipitación en mm

R: Escorrentía superficial en mm

ETR: Evapotranspiración real en mm

μ : Término de discrepancia

Como se ha mencionado anteriormente, para el estudio del balance hídrico superficial, sólo se cuenta con el parámetro de la precipitación “P” (**Tabla 20**) y la evapotranspiración real “ETR” (**Tabla 36**) calculada en el capítulo anterior. Por lo tanto, el balance hídrico superficial de la subcuenca del río Paltiture se realizará utilizando la siguiente expresión (UNESCO, 1982):

$$R = P - ETR$$

Los parámetros de P y ETR son del año 1995 hasta el 2010, por lo que la escorrentía calculada será para los años entre 1995 y 2010 (**Tabla 37**).

Tabla 37. Esorrentía superficial en la subcuenca del río Paltiture en mm.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1995	43.7	64.7	43.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.0	182.4
1996	81.4	70.5	14.5	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.2	183.5
1997	100.5	143.8	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9	0.0	254.9
1998	128.4	36.0	48.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.2	0.0	225.5
1999	95.4	143.3	143.2	24.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	18.3	426.9
2000	127.5	128.6	64.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	56.7	377.0
2001	156.3	135.9	60.7	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.5	381.7
2002	73.3	123.4	90.1	16.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	48.8	353.7
2003	62.4	87.0	59.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.1	227.9
2004	97.2	88.3	30.5	12.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	228.2
2005	120.7	130.1	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.4	284.8
2006	145.6	53.4	96.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5	27.4	336.1
2007	70.0	21.3	104.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.6	218.2
2008	137.4	29.5	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	68.8	240.9
2009	23.5	115.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4	16.3	166.4
2010	109.8	118.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	231.3
Máximo	156.3	143.8	143.2	24.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	13.5	68.8	426.9
Promedio	98.3	93.1	47.7	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.9	23.6	270.0
Mínimo	23.5	21.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	166.4

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5

Disponibilidad del recurso hídrico

El objetivo de este estudio es establecer el volumen de la presa Paltiture, que permitirá mantener durante el período de estiaje un caudal ecológico, con la finalidad de disminuir los elementos contaminantes en el río Tambo, debidos a causas litológicas, como se explicó en el acápite **1.5.1**. Este volumen lo analizaremos desde dos puntos de vista: el caudal ecológico y la capacidad hídrica de la zona.

5.1. Caudal ecológico

Es el flujo de agua necesario para poder preservar la ecología en su cauce, como la flora y fauna, disolución de contaminantes, preservación de paisaje, etc.

Existen diferentes métodos hidrológicos para determinar el caudal ecológico. Para la presente tesis se utilizaron: el método de curva de permanencia y el método de Tennant (Endesa Chile, 2011).

5.1.1. Método de la curva de permanencia

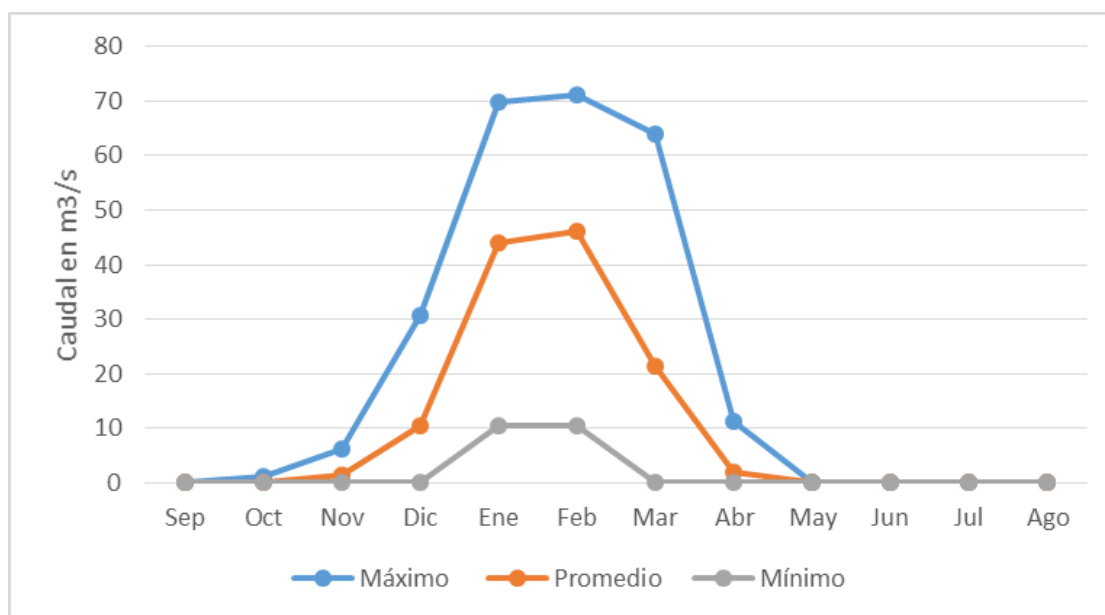
La curva de permanencia o persistencia indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos, y por lo tanto permite realizar estimaciones del comportamiento a futuro del recurso hídrico de interés.

Este método considera que el caudal ecológico se obtiene al determinar el caudal mensual al 90% de excedencia. La **Tabla 38** y el **Gráfico 36** muestran los caudales mensuales de la subcuenca del río Paltiture, basados en la **Tabla 37**, con los cuales se han determinado las curvas de persistencia.

Tabla 38. Caudal mensual en m³/s de la subcuenca del río Paltiture.

Año	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Prom.
1995	0.0	0.0	0.0	13.8	19.5	32.0	19.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1
1996	0.0	0.0	0.0	6.3	36.4	34.9	6.5	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1
1997	0.0	0.0	3.6	0.0	44.9	71.2	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.1
1998	0.0	0.0	5.6	0.0	57.4	17.8	21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.6
1999	0.0	1.2	0.0	8.2	42.6	70.9	64.0	11.2	0.0	0.0	0.0	0.0	16.5
2000	0.0	0.0	0.0	25.3	57.0	63.6	28.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.6
2001	0.0	0.0	0.0	8.3	69.9	67.2	27.1	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	14.8
2002	0.0	0.0	0.9	21.8	32.8	61.1	40.3	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	13.7
2003	0.0	0.0	0.0	8.5	27.9	43.0	26.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.8
2004	0.0	0.0	0.0	0.0	43.5	43.7	13.6	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9
2005	0.0	0.0	0.0	14.9	53.9	64.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1
2006	0.0	0.0	6.2	12.2	65.1	26.4	43.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.7
2007	0.0	0.0	0.0	10.1	31.3	10.6	46.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2
2008	0.0	0.0	0.0	30.8	61.4	14.6	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1
2009	0.0	0.0	5.3	7.3	10.5	57.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7
2010	0.0	0.0	0.0	1.4	49.1	58.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1
Máximo	0.0	1.2	6.2	30.8	69.9	71.2	64.0	11.2	0.0	0.0	0.0	0.0	21.2
Promedio	0.0	0.1	1.4	10.6	43.9	46.1	21.3	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	10.4
Mínimo	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfico 36.** Caudales mensuales representativos de la subcuenca del río Paltiture.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 39** y **Gráfico 37** se presentan los caudales mensuales con persistencia de 50%, 75% y 90% que hay en la subcuenca del río Paltiture.

Tabla 39. Persistencia al 50%, 75% y 90% de excedencia del caudal mensual en la subcuenca del río Paltiture (m^3/s).

m ³ /s	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
50%	44.2	50.3	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	10.3
75%	32.4	30.6	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	5.8
90%	23.7	16.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3

Fuente: Elaboración propia.

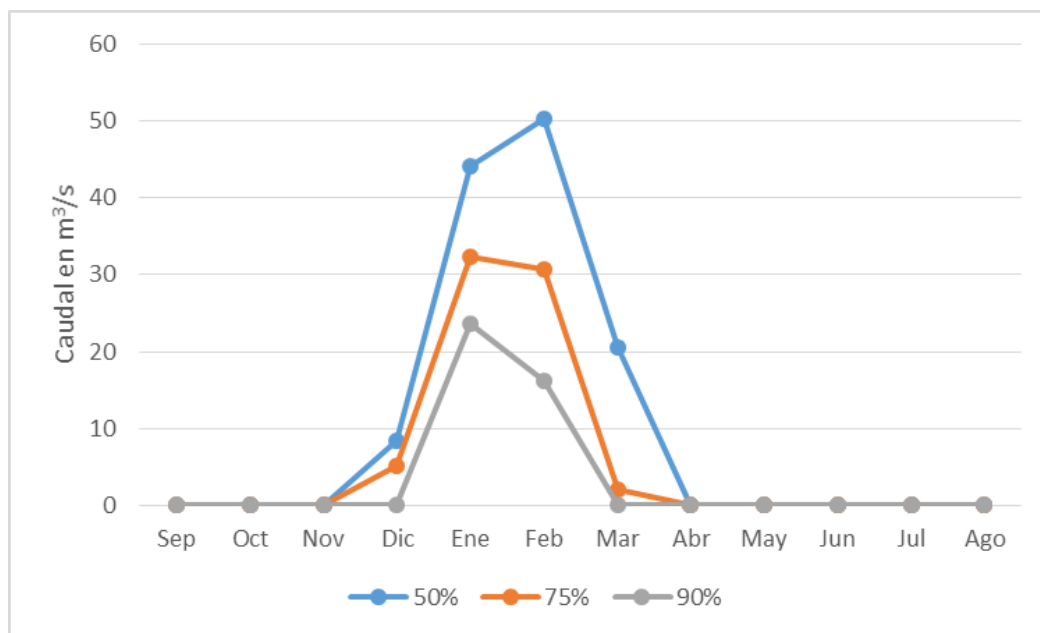


Gráfico 37. Caudales mensuales en m^3/s en la subcuenca del río Paltiture.
Fuente: Elaboración propia.

Según el método de curvas de permanencia, se obtiene que el mínimo caudal que debe entregar la subcuenca del río Paltiture a lo largo del año es de $3.3 m^3/s$.

5.1.2. Método de Tennant

Determina que el flujo de agua necesario para que el hábitat no se degrade, debe ser como mínimo el 10% del flujo medio anual.

La **Tabla 38** muestra que el caudal medio anual en la subcuenca es de $10.4 m^3/s$, entonces, el flujo mínimo necesario para conservar el hábitat es de $1.04 m^3/s$.

Para garantizar la conservación del hábitat, se tomó como caudal ecológico el calculado por el método de curvas de permanencia, $3.3 m^3/s$ equivalente a 103 MMC anuales.

5.2. Capacidad hídrica de la zona

Desde este punto de vista, se determinó la capacidad que podrá tener el embalse teniendo en cuenta un caudal al 75% de excedencia.

La **Tabla 39** muestra que al 75% de excedencia, el caudal es de 5.7 m³/s equivalente a 180 MMC anuales.

5.3. Determinación de la capacidad requerida del embalse

Para determinar el volumen útil requerido del embalse Paltiture, se analizaron tres escenarios teniendo en cuenta lo siguiente:

- Escenario 1: Caudal de descarga al 75% de persistencia.
- Escenario 2: Caudal ecológico.
- Escenario 3: Caudal de descarga al 75% de persistencia sin que éste, en ningún momento, sea inferior al caudal ecológico.

Para cada escenario se realizó una simulación, la cual consistió en determinar la cantidad de recurso hídrico a almacenar en el reservorio como volumen útil para cada mes del año con los datos desde 1995 hasta 2010, teniendo en cuenta una cantidad máxima de almacenaje, y ésta dependerá de los criterios del escenario a evaluar.

5.3.1. Escenario 1

Se realizó la simulación para determinar el volumen del embalse, teniendo en cuenta un caudal requerido de descarga igual al caudal analizado al 75% de persistencia.

La persistencia de 75%, es el volumen de agua que nos aseguraremos de tener a lo largo de un año, y que de cada 4 años, por lo menos 3 años se tendrá una masa anual igual o mayor que esta.

En la **Tabla 40** y **Tabla 41** se muestran la simulación del caudal de descarga de 5.7 m³/s, teniendo en cuenta que 4 de los 16 años presentados no se llegaría a descargar el caudal de 5.7 m³/s. Con lo cual se estima un volumen útil mínimo para el embalse equivalente a 122 MMC.

Tabla 40. Simulación de los volúmenes almacenados bajo el escenario 1 en MMC, con una capacidad de embalse de 122 MMC.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1995	37.0	100.7	122.0	107.2	91.9	77.1	61.8	46.6	31.8	16.5	1.7	23.5
1996	105.6	122.0	122.0	110.8	95.5	80.7	65.4	50.1	35.3	20.0	5.2	6.9
1997	111.9	122.0	110.0	95.2	79.9	65.1	49.8	34.5	19.7	4.4	0.0	0.0
1998	122.0	122.0	122.0	107.2	91.9	77.1	61.8	46.6	31.8	16.5	16.3	1.0
1999	99.9	122.0	122.0	122.0	106.7	91.9	76.6	61.3	46.6	34.4	19.6	26.2
2000	122.0	122.0	122.0	107.2	91.9	77.1	61.8	46.6	31.8	16.5	1.7	54.3
2001	122.0	122.0	122.0	119.7	104.4	89.6	74.3	59.0	44.2	29.0	14.2	21.0
2002	93.5	122.0	122.0	122.0	106.7	91.9	76.6	61.3	46.6	31.3	18.7	61.8
2003	121.2	122.0	122.0	107.2	91.9	77.1	61.8	46.6	31.8	16.5	1.7	9.2
2004	110.3	122.0	122.0	121.8	106.5	91.7	76.5	61.2	46.4	31.1	16.3	1.0
2005	122.0	122.0	107.5	92.7	77.4	62.7	47.4	32.1	17.3	2.0	0.0	24.6
2006	122.0	122.0	122.0	107.2	91.9	77.1	61.8	46.6	31.8	16.5	17.8	35.3
2007	103.8	115.6	122.0	107.2	91.9	77.1	61.8	46.6	31.8	16.5	1.7	13.5
2008	122.0	122.0	112.9	98.1	82.8	68.0	52.7	37.5	22.7	7.4	0.0	67.1
2009	79.9	122.0	106.7	91.9	76.6	61.8	46.6	31.3	16.5	1.2	0.1	4.3
2010	120.5	122.0	106.7	91.9	76.6	61.8	46.6	31.3	16.5	1.2	0.0	0.0
MAX	122.0	122.0	122.0	122.0	106.7	91.9	76.6	61.3	46.6	34.4	19.6	67.1
MIN	37.0	100.7	106.7	91.9	76.6	61.8	46.6	31.3	16.5	1.2	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Simulación de los caudales de descarga bajo el escenario 1 en m³/s, con una capacidad de embalse de 122 MMC.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1995	5.7	5.7	11.3	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
1996	5.7	28.1	6.5	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
1997	5.7	67.0	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.4	0
1998	11.8	17.8	21.9	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
1999	5.7	61.8	64.0	11.2	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2000	21.2	63.6	28.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2001	44.6	67.2	27.1	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2002	5.7	49.3	40.3	7.5	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2003	5.7	42.7	26.6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2004	5.7	38.9	13.6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2005	8.8	64.4	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	0.8	5.7
2006	28.7	26.4	43.0	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2007	5.7	5.7	44.2	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2008	20.9	14.6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	2.8	5.7
2009	5.7	39.6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2010	5.7	58.0	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	0.5	1.4
MAX	44.6	67.2	64.0	11.2	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
MIN	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	0.5	0.0

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. Escenario 2

Se realizó la simulación para hallar el volumen del embalse, teniendo en cuenta el volumen del caudal ecológico.

En la **Tabla 42** y **Tabla 43** se muestran la simulación del caudal de descarga de 3.3 m³/s, con la cual se obtuvo una capacidad de embalse útil mínimo equivalente a 83 MMC.

Tabla 42. Simulación de los volúmenes almacenados bajo el escenario 2 en MMC, con una capacidad de embalse de 83 MMC.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1995	43.5	83.0	83.0	74.5	65.8	57.3	48.5	39.8	31.3	22.6	14.1	42.4
1996	83.0	83.0	83.0	78.1	69.3	60.9	52.1	43.4	34.9	26.1	17.7	25.9
1997	83.0	83.0	77.5	69.0	60.3	51.8	43.0	34.3	25.8	17.1	18.0	9.3
1998	83.0	83.0	83.0	74.5	65.8	57.3	48.5	39.8	31.3	22.6	28.7	20.0
1999	83.0	83.0	83.0	83.0	74.2	65.8	57.0	48.3	39.8	34.2	25.7	38.9
2000	83.0	83.0	83.0	74.5	65.8	57.3	48.5	39.8	31.3	22.6	14.1	73.2
2001	83.0	83.0	83.0	83.0	74.2	65.8	57.0	48.3	39.8	31.0	22.6	35.9
2002	83.0	83.0	83.0	83.0	74.2	65.8	57.0	48.3	39.8	31.0	24.8	74.4
2003	83.0	83.0	83.0	74.5	65.8	57.3	48.5	39.8	31.3	22.6	14.1	28.2
2004	83.0	83.0	83.0	83.0	74.2	65.8	57.0	48.3	39.8	31.0	22.6	13.8
2005	83.0	83.0	75.1	66.6	57.8	49.4	40.6	31.9	23.4	14.6	6.2	37.3
2006	83.0	83.0	83.0	74.5	65.8	57.3	48.5	39.8	31.3	22.6	30.3	54.3
2007	83.0	83.0	83.0	74.5	65.8	57.3	48.5	39.8	31.3	22.6	14.1	32.4
2008	83.0	83.0	80.4	72.0	63.2	54.7	46.0	37.2	28.8	20.0	11.5	83.0
2009	83.0	83.0	74.2	65.8	57.0	48.5	39.8	31.0	22.6	13.8	19.0	29.8
2010	83.0	83.0	74.2	65.8	57.0	48.5	39.8	31.0	22.6	13.8	5.3	0.3
MAX	83.0	83.0	83.0	83.0	74.2	65.8	57.0	48.3	39.8	34.2	30.3	83.0
MIN	43.5	83.0	74.2	65.8	57.0	48.5	39.8	31.0	22.6	13.8	5.3	0.3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43. Simulación de los caudales de descarga bajo el escenario 2 en m³/s, con una capacidad de embalse de 83 MMC.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1995	3.3	15.7	19.2	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
1996	21.2	34.9	6.5	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
1997	23.6	71.2	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
1998	29.8	17.8	21.9	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
1999	19.1	70.9	64.0	11.2	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
2000	40.5	63.6	28.7	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
2001	66.2	67.2	27.1	4.8	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
2002	15.2	61.1	40.3	7.5	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
2003	24.7	43.0	26.6	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
2004	23.0	43.7	13.6	5.6	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
2005	28.1	64.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
2006	48.0	26.4	43.0	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
2007	20.6	10.6	46.6	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
2008	42.5	14.6	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	4.1
2009	10.5	57.0	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
2010	29.2	58.6	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
MAX	66.2	71.2	64.0	11.2	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	4.1
MIN	3.3	10.6	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. Escenario 3

Se realizó la simulación para determinar el volumen del embalse, teniendo en cuenta la capacidad hídrica de la zona, la cual considera un análisis al 75% de persistencia, y teniendo como caudal mínimo el caudal ecológico; esto quiere decir que se tendrá una descarga de 5.7 m³/s y, en ningún momento, el caudal de descarga sea inferior a 3.3 m³/s. De este análisis se obtuvo que la capacidad útil mínimo del embalse debe ser de 141 MMC (Tabla 44 y Tabla 45).

Tabla 44. Simulación de los volúmenes almacenados bajo el escenario 3 en MMC, con una capacidad de embalse de 141 MMC.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1995	37.0	100.7	136.9	122.1	106.8	92.0	76.7	61.5	46.7	31.4	16.6	38.4
1996	120.5	141.0	141.0	129.8	114.5	99.7	84.4	69.1	54.3	39.0	24.2	25.9
1997	130.9	141.0	129.0	114.2	98.9	84.1	68.8	53.5	38.7	23.4	18.1	2.8
1998	141.0	141.0	141.0	126.2	110.9	96.1	80.8	65.6	50.8	35.5	35.3	20.0
1999	118.9	141.0	141.0	141.0	125.7	110.9	95.6	80.3	65.6	53.4	38.6	45.2
2000	141.0	141.0	141.0	126.2	110.9	96.1	80.8	65.6	50.8	35.5	20.7	73.3
2001	141.0	141.0	141.0	138.7	123.4	108.6	93.3	78.0	63.2	48.0	33.2	40.0
2002	112.5	141.0	141.0	141.0	125.7	110.9	95.6	80.3	65.6	50.3	37.7	80.8
2003	140.2	141.0	141.0	126.2	110.9	96.1	80.8	65.6	50.8	35.5	20.7	28.2
2004	129.3	141.0	141.0	140.8	125.5	110.7	95.5	80.2	65.4	50.1	35.3	20.0
2005	141.0	141.0	126.5	111.7	96.4	81.7	66.4	51.1	36.3	21.0	6.2	30.8
2006	141.0	141.0	141.0	126.2	110.9	96.1	80.8	65.6	50.8	35.5	36.8	54.3
2007	122.8	134.6	141.0	126.2	110.9	96.1	80.8	65.6	50.8	35.5	20.7	32.5
2008	141.0	141.0	131.9	117.1	101.8	87.0	71.7	56.5	41.7	26.4	11.6	78.7
2009	91.5	141.0	125.7	110.9	95.6	80.8	65.6	50.3	35.5	20.2	19.1	23.3
2010	139.5	141.0	125.7	110.9	95.6	80.8	65.6	50.3	35.5	20.2	5.4	0.0
MAX	141.0	141.0	141.0	141.0	125.7	110.9	95.6	80.3	65.6	53.4	38.6	80.8
MIN	37.0	100.7	125.7	110.9	95.6	80.8	65.6	50.3	35.5	20.2	5.4	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45. Simulación de los caudales de descarga bajo el escenario 3 en m³/s, con una capacidad de embalse de 141 MMC.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1995	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
1996	5.7	26.4	6.5	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
1997	5.7	67.0	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
1998	5.8	17.8	21.9	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
1999	5.7	61.8	64.0	11.2	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2000	21.2	63.6	28.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2001	44.6	67.2	27.1	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2002	5.7	49.3	40.3	7.5	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2003	5.7	42.7	26.6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2004	5.7	38.9	13.6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2005	8.8	64.4	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2006	23.9	26.4	43.0	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2007	5.7	5.7	44.2	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2008	20.9	14.6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2009	5.7	36.5	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
2010	5.7	58.0	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	3.4
MAX	44.6	67.2	64.0	11.2	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
MIN	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	3.4

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- ✓ El análisis de la presente tesis se realizó a causa de la problemática actual en el río Tambo, que es la derivación de las aguas de su tributario, el río Vizcachas, mediante el reservorio de Pasto Grande, hacia la cuenca del río Moquegua, ocasionando la disminución del caudal del río Tambo, que genera la elevación de las sales contaminantes, la cual se hace más notoria en época de estiaje, provocando daños en los cultivos y en la población de la cuenca del Tambo. Por lo tanto, queda a cargo de la subcuenca del río Paltiture el poder minimizar la contaminación del río Tambo, lo cual, a través de este estudio, se pudo demostrar que sí es factible, que la subcuenca por medio de un embalse, puede aliviar el problema.
- ✓ La subcuenca del río Paltiture, comprende un área de 1 197.1 km² con una red de drenaje de 50.4 km. Tiene un factor de compacidad igual a 1.67 lo que significa que presenta una forma alargada y alta eficiencia en la escorrentía y drenaje, y un factor de forma de 0.47, lo que muestra que tiene pocas probabilidades de inundación ante la ocurrencia de una tormenta.
- ✓ La zona de estudio es de difícil acceso por lo que, para el análisis del balance hídrico superficial de la subcuenca, se tuvieron dos limitantes:
 - En el análisis pluviométrico de la zona, no hubieron estaciones meteorológicas dentro de la zona de estudio, así que se hizo uso de estaciones vecinas, lo más cercanas posible.
 - Tampoco existieron estaciones hidrométricas en la cuenca por lo que, se aplicó la metodología para análisis sin datos hidrométricos, del cual se determinó la escorrentía de la subcuenca del río Paltiture.
- ✓ La subcuenca del río Paltiture, por encontrarse en la sierra sur del país, tiene un régimen de precipitaciones estacional, con abundantes lluvia entre Octubre y Abril,

mientras que entre Mayo y Septiembre, es época de estiaje. Se obtuvo del análisis pluviométrico, que la precipitación media anual en la subcuenca del río Paltiture es de 578.4 mm.

- ✓ Entre Enero y Marzo, la precipitación es mayor que la ETP calculada, por lo que la ETR es igual a la ETP, y por tener mayor cantidad de precipitación durante esos meses, se llega a saturar el suelo. El resto de meses, desde Abril hasta Diciembre, al no tener mucha precipitación, la evapotranspiración se abastece de la reserva del suelo y de eventuales precipitaciones, por lo tanto la ETR es menor a la ETP.
- ✓ Para determinar el volumen del embalse Paltiture, se realizó una simulación con los volúmenes mensuales obtenidos en el balance hídrico superficial, calculados entre 1995 y 2010, determinándose posibles volúmenes útiles para el embalse desde el punto de vista de tres escenarios:
 - Según la capacidad hídrica de la zona, el volumen útil mínimo del embalse debería ser de 122 MMC.
 - Según el caudal ecológico, el volumen útil mínimo del embalse debería ser de 83 MMC.
 - Según la capacidad hídrica de la zona y además teniendo en cuenta que el caudal mensual no puede ser inferior al caudal ecológico, el volumen útil mínimo del embalse debería ser de 141 MMC.

6.2. Recomendación

- ✓ Para minimizar la contaminación del río Tambo, sería recomendable la construcción de un embalse con volumen útil mínimo de 83 MMC, porque con esto se asegura el caudal ecológico que garantiza la preservación de la ecología del cauce.
- ✓ Teniendo en cuenta la capacidad hídrica de la zona, sería recomendable la construcción de un embalse con volumen útil mínimo de 122 MMC, porque con esto se garantiza el máximo aprovechamiento del recurso hídrico de la subcuenca del río Paltiture.
- ✓ Teniendo en cuenta la capacidad hídrica de la zona y que el caudal mensual no sea inferior al caudal ecológico, sería recomendable la construcción de un embalse con volumen útil mínimo de 141 MMC, porque así se garantiza el aprovechamiento del recurso hídrico de la zona cuidando la ecología del cauce.
- ✓ Lamentablemente hasta la fecha, se hace muy difícil la realización de estudios con resultados precisos por la falta de datos, ya que no se cuentan con estaciones meteorológicas e hidrométricas suficientes. Por lo tanto se recomienda implementar estaciones meteorológicas e hidrométricas o volver a poner operativas las estaciones cerradas, a fin de determinar resultados con mayor certeza, además de poder comparar datos ya sean pluviométricos, temperatura, evaporación y caudales de diferentes zonas para poder obtener estudios más fidedignos.

Bibliografía

- ANA (2008). *Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú*. Dirección de conservación y planeamiento de Recursos Hídricos. Lima - Perú.
- ANA (2015). *Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos en la cuenca del río Tambo y Moquegua*. Lima - Perú. Disponible en <http://www.ana.gob.pe>.
- ANA (2015). *Sistema Nacional de información de recursos hídricos – Hidrometría*. Lima - Perú: ANA. Disponible en <http://www.ana.gob.pe>.
- Asesores Técnicos Asociados S.A. - ATA (2013). *Plan de gestión de la oferta de agua – cuenca de los ríos Moquegua y Tambo*. Lima – Perú.
- Agencia peruana de noticias Andina, (Enero 2015). *Construcción represa Paltiture*. Lima - Perú: Andina. Disponible en <http://www.andina.com.pe>.
- Breña A.F, Jacobo M.A, (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. México: Editorial LIMUSA S.A.
- Chow V.T, MAIDMENT & MAYS (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá – Colombia: Editorial McGraw-hill latinoamericana S.A.
- Caretas (2003). *La diablada del agua*. Lima – Perú. Artículo.
- Daly, G. (Abril 2015). *Problemática Tía María*. Lima – Perú: El Comercio. Disponible en <http://elcomercio.pe/peru/>
- Endesa (2011). *Introducción al cálculo de caudales ecológicos, un análisis de las tendencias actuales*. Chile. Disponible en <http://www.endesa.cl/>

- Farías (2015). *Apuntes del curso Hidrología – Universidad de Piura*. Piura – Perú.
- Holdridge L.R (1967). *Clasificación de “zonas de vida” según el sistema Holdridge*. Costa Rica: Editorial IICA.
- INADE (2001). *Balance Hidrológico en los Valles de Tambo, Moquegua e Ilo*. Lima – Perú. Instituto Nacional de Desarrollo.
- INEI (2015). *Proyecciones de población, según departamento, provincia y distrito – 2000 al 2015*. Lima – Perú. Boletín Especial.
- INADE, ATA (2002). *Plan de Gestión de la Oferta de Agua. Cuenca de los Ríos Moquegua y Tambo*. Lima – Perú. Instituto Nacional de Desarrollo.
- La Republica (Junio 2012). *Tambo amenaza con protesta por represas de Moquegua*. Lima – Perú. Disponible en <http://www.larepublica.pe>.
- MINAG (2005). *Estudio de Factibilidad – Afianzamiento Hídrico del valle de Tambo*. Lima – Perú. Intendencia de Recursos Hídricos.
- Minería (2014). *Canon minero y regalías*. Lima – Perú. Disponible en <http://www.propuestaciudadana.org.pe>.
- Ministerio de Energía y Minas, (Mayo 2015). *Problemática tía María*. Lima – Perú. Disponible en www.minem.gob.pe.
- MVCS (2011). *Normalización de infraestructura urbana y propuesta de estándares – Capítulo III*. Lima – Perú.
- MVCS (2013). *Plan de gestión de la oferta de agua en las cuencas del ámbito del Proyecto Pasto Grande – Volumen II*. Lima – Perú. Instituto Nacional de Desarrollo Proyecto Especial Pasto Grande.
- PERPG (1987). *Factibilidad técnico-económica para dar solución a la problemática de falta de agua*. Lima – Perú. Decreto supremo N°024-87-MIPRE.
- PERPG (2003). *Comisión investigadora encargada de cumplir las conclusiones y recomendaciones a las que arribaron las 5 comisiones investigadores respecto al periodo del ex presidente Alberto Fujimori Fujimori*. Lima - Perú: Imprenta del gobierno Peruano.
- PERPG (Febrero 2015). *Alcance del proyecto Pasto Grande*. Lima – Perú. Disponible en <http://www.pastogrande.gob.pe>.
- RPP Noticias (Noviembre 2014). *Arequipa – Agricultores del valle del Tambo sin agua para regar*. Lima – Perú: RPP Noticias. Disponible en <http://www.rpp.com.pe>

- SENAMHI (Enero 2015). *Datos históricos del Clima*. Lima – Perú. Disponible en <http://www.senamhi.gob.pe>.
- SENAMHI (Marzo 2015). *Datos meteorológicos de las estaciones Ichuña, Lagunillas y Crucero Alto, 1995 – 2010*. Lima – Perú.
- Southern Peru Copper Corporation (2010). *Estudio de abastecimiento de agua - Información complementaria al capítulo 7 del EIA del Proyecto Minero Tía María*. Tacna – Toquepala.
- UNESCO (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur*. Montevideo – Uruguay: Editorial UNESCO-ROSTLAC.
- Villon, M (2005). *Hidrología Estadística*. Lima - Perú: Editorial Tecnológica de Costa Rica.