

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS  
CAMANÁ, MAJES, SIHUAS, QUILCA –  
VITTOR – CHILI CON INFORMACIÓN  
SATELITAL.**

Presentado por:

**Juan Francisco García Quijano**

Trabajo de Suficiencia Profesional para optar el título de  
INGENIERO FORESTAL

---

Lima - Perú  
2018

ACTA DE SUSTENTACIÓN  
N° 007/2018/FCF

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Suficiencia Profesional , presentado por el ex-alumno de la Facultad de Ciencias Forestales, Bach. Juan Francisco García Quijano, intitulado “ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS CAMANÁ, MAJES, SIHUAS, QUILCA - VITTOR - CHILI CON INFORMACIÓN SATELITAL.”.

Oídas las respuestas a las observaciones formuladas, lo declaramos:

APTO

con el calificativo de Sobresaliente

En consecuencia queda en condición de ser considerado APTO y recibir el título de INGENIERO FORESTAL.

La Molina, 6 de Abril de 2018

.....  
M.S. Jorge Mario Chávez Salas  
Presidente

.....  
Mg. Sc. Roxana Guillén Quispe  
Miembro

.....  
Mg. Sc. Cayo Ramos Taipe  
Miembro

.....  
M.S. Carlos Alberto Llerena Pinto  
Asesor

## *DEDICATORIA*

*Deseo dedicar este trabajo profesional a Nuestro Señor Jesucristo de quién recibimos toda bondad.*

*Igualmente, este trabajo es el resultado no solo de un esfuerzo profesional propio, sino desde el apoyo de mis padres, Paco y Gaby, y también de mi esposa Juany y a mis hijos: Jesús, Rodrigo y Hector. A ellos les dedico este fruto porque son parte fundamental del mismo.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento*

*Al Profesor Carlos A. Llerena Pinto por su constante apoyo desde mis años de universidad y quién me motivo a seguir investigando en el campo de la hidrología.*

*De igual manera deseo expresar mi más sincera gratitud a los miembros de comité evaluador y a todos mis clientes quienes han hecho posible este trabajo profesional.*

*Además, quiero incluir en mis agradecimientos a un sin número de gente desde investigadores de la NASA a quienes jamás he conocido en persona y a otros profesionales que hicieron posible para mí realizar la hidrología satelital en el Perú.*

## *RESUMEN*

Básicamente, en el Perú, la falta de datos hidrométricos y meteorológicos es el mayor problema que limita de manera importante el desarrollo de estudios hidrológicos y la correcta evaluación de los recursos hídricos para las diferentes actividades humanas. (Curso de Ordenación Cuencas de Pregrado de la Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM).

Uno de los mayores problemas que se tiene en el Perú es el de no contar con datos hidrometeorológicos (principalmente precipitación y caudales) confiables y suficientes. Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), las redes hidrométricas y meteorológicas se encuentran en un estado variable de mantenimiento en función de su situación y del gestor responsable de su operación [ANA, Proyectos Especiales, SENAMHI, Juntas de Usuarios de Riego y otras instituciones]. Estas estaciones miden variables hidrometeorológicas de frecuencia mínima diaria y tiene registros de diferente longitud, lo que da series muy variables en cuanto a la temporalidad. Por otro lado, la densidad y número de estaciones existentes es insuficiente en el marco nacional y más aún, estando estas concentradas principalmente en la zona de la costa del país, donde existe el porcentaje más alto de infraestructura de medición y control, pero donde paralelamente los registros pluviométricos son escasos. Similares condiciones tenemos en términos de información edafológica y de vegetación

Dos situaciones problemáticas consisten en las necesidades de un cliente en el departamento de Arequipa, que necesitaba estudios hidrológicos detallados tanto para (1) ingeniería, abastecimiento de aguas a la operación y para el diseño de estructuras hidráulicas y viales y para (2) medio ambiente, línea base hidrológica para su EIA.

El problema residía no solo en la falta de información puntual y local para la operación, sino que la operación, por su naturaleza tenía una gran área de influencia y por lo tanto necesitaba evaluar los recursos hídricos en las cuencas Camaná, Majes, Sihuas, Quilca-Vitor-Chili. Es decir, una gran área lo que complicaba aún más la situación.

La solución a ambos problemas consistía en encontrar nuevas fuentes de información sobre precipitaciones con series de tiempo representativas y que cubrieran el territorio nacional

completo. Estas fuentes debían ser alternativas a las tradicionales, es decir, a la limitada base de datos del SENAMHI.

Gracias al curso de Ordenación de Cuencas de Pregrado y los estudios de Maestría y Doctorado cursados en la Universidad Católica de Leuven y en la Universidad Libre de Ámsterdam y los cursos y trabajos de investigación desarrollados en la Universidad de Harvard, se decidió usar la información de los satélites Tropical Rainfall Measuring Mission y del Global Precipitation Mission (<https://pmm.nasa.gov/>). Esta base de datos cubre desde noviembre de 1997 hasta el presente.

Esta información, aunque valiosa, no es útil en su formato actual debido principalmente a su baja resolución espacial 25 km por 25 km. Es decir, un solo pixel tiene un área de 625 km<sup>2</sup>.

Sin embargo, existen estudios doctorales que han versado sobre el aumento de resolución (downscaling) de esta información en base a información de la actividad fotosintética.

A continuación, describo brevemente la metodología desarrollada (Jia *et al.*, 2011).

Los datos originales del satélite TRMM (<http://trmm.gsfc.nasa.gov>) nos dan la precipitación promedio cada 3 horas con una resolución espacial de (25 km \* 25 km) para todo el planeta entre los 50° grados Latitud N y S. Esta información, aunque es valiosa, no es útil en este formato y resolución.

Se realizará el aumento de resolución de los conjuntos de datos del TRMM utilizando un método basado en el supuesto de que existe una relación entre el índice de vegetación NDVI (actividad fotosintética que es una función de la humedad del suelo) y la precipitación a diferentes escalas. La información de NDVI tiene una resolución espacial de 1km<sup>2</sup> cada 8 días. Esta relación matemática se utiliza a una escala más fina para generar más detalle en las mallas de precipitación. Se utilizará un método gradual para probar el supuesto.

Primero, se comparará el NDVI promedio desde 1998 hasta el 2016 con la precipitación promedio anual acumulada del satélite TRMM durante el mismo periodo a diferentes resoluciones (0.25°, 0.50°, 0.75°, 1.00° y 1.25°). Se reducirá la resolución de los datos del NDVI, con una resolución original de 1 km<sup>2</sup> mediante el promedio de las celdas de la malla.

Para cada resolución, se realizará la regresión de los valores del NDVI con respecto a la precipitación TRMM. La resolución que mejor ajuste tuviera es la que se utilizará para el procedimiento de downscaling o aumento de resolución.

Esta nueva base de datos con precipitación de alta resolución espacial y temporal se aplicó al modelo SWAT para poder estimar la hidrología de las cuencas en mención.

Los resultados han sido más que aceptables.

## *LISTA DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS*

|                    |   |
|--------------------|---|
| <b>ANA:</b>        | Autoridad Nacional del Agua   |
| <b>BIAS:</b>       | Proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, nos cuantifica el error sistemático del modelo. |
| <b>D.E.D:</b>      | Desviación Standard de los desvíos  |
| <b>ENSO:</b>       | El Niño Southern Oscillation (Oscilación del sur El Niño)   |
| <b>HYDRACCESS:</b> | Software hidrológico capaz de almacenar y trabajar información hidrológica en una base de datos en formato Microsoft Access 2000                |
| <b>IOS:</b>        | Southern Oscillation Index (Índice de Oscilación Sur)   |
| <b>JAXA:</b>       | Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa  |
| <b>MINAGRI:</b>    | Ministerio de Agricultura y Riego   |
| <b>MODIS:</b>      | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Espectroradiómetro de imágenes de moderada resolución)   |
| <b>MVR:</b>        | Vector Regional de Índices Pluviométricos   |
| <b>NASA:</b>       | National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio)   |
| <b>NSE:</b>        | Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe  |
| <b>ONERN:</b>      | Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales  |
| <b>PET:</b>        | Potential Evapotranspiration (Evapotranspiración potencial)   |
| <b>R:</b>          | Coefficiente de correlación   |
| <b>R2:</b>         | Coefficiente de determinación   |
| <b>RSR:</b>        | Desviación estándar de los datos medidos  |
| <b>SENAMHI:</b>    | Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú   |
| <b>SWAT:</b>       | Soil and Water Assessment Tool (Herramienta para asesoramiento hídrico y de suelo)  |
| <b>TRMM:</b>       | Tropical Rainfall Measuring Mission (Misión de medida de lluvia tropical)   |
| <b>UH:</b>         | Unidad hidrográfica   |
| <b>USDA:</b>       | United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos)   |



# ÍNDICE GENERAL

Página

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Estudio hidrológico de las cuencas Camaná, Majes, Sihuas, Quilca-Vittor-Chili con información satelital.....</b> | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Antecedentes.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.2 Objetivos .....</b>  | <b>3</b>  |
| 1.2.1 Generales.....  | 3         |
| 1.2.2 Específicos .....   | 3         |
| <b>2 Cuerpo del trabajo.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2.1 Descripción de las cuencas de estudio. ....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2.2 Precipitación .....</b>  | <b>13</b> |
| 2.2.1 Análisis exploratorio del vector regional.....  | 13        |
| 2.2.2 Validación de Precipitación Satelital TRMM .....  | 17        |
| 2.2.3 Validación en Meses Húmedos.....  | 21        |
| 2.2.4 Distribución de la Precipitación Satelital TRMM.....  | 22        |
| <b>2.3 Meteorología .....</b>   | <b>31</b> |
| 2.3.1 Radiación Solar y Temperatura.....  | 31        |
| 2.3.2 Humedad Relativa.....   | 37        |
| 2.3.3 Velocidad del Viento .....  | 38        |
| <b>2.4 Caracterización hidrológica .....</b>  | <b>39</b> |
| 2.4.1 Hidrografía .....   | 39        |
| 2.4.2 Parámetros Morfológicos.....  | 41        |
| 2.4.3 Aspectos Ecológicos de las Cuencas de Estudio.....  | 53        |
| <b>2.5 Simulación hidrológica con el modelo SWAT. ....</b>  | <b>55</b> |
| 2.5.1 Área de Dominio del Modelo y Tratamiento de la Información Pluviométrica.....                                   | 55        |
| 2.5.2 Planteamiento de la Simulación .....  | 56        |
| 2.5.3 Definición de la Zona de Estudio Hidrológico.....   | 57        |
| 2.5.4 Suelos .....  | 60        |
| 2.5.5 Mapa de Uso de Suelo.....   | 62        |
| 2.5.6 Mapa de Pendientes .....  | 65        |
| <b>2.6 Resultados de las Simulaciones.....</b>  | <b>67</b> |
| 2.6.1 Validación de los Caudales Simulados.....   | 67        |
| 2.6.2 Caudales Promedio Mensuales en la Cuenca Camaná .....   | 71        |
| 2.6.3 Caudales Promedio Mensuales en la Cuenca Quilca-Vitor-Chili .....   | 72        |
| 2.6.4 Caudales Promedio Mensuales en la Cuenca Siguas.....  | 74        |
| <b>2.7 Balances Hídrico .....</b>   | <b>75</b> |
| 2.7.1 Balance Hídrico de la zona de estudio hidrológico .....   | 75        |
| 2.7.2 Balance Hídrico en la Cuenca Camaná.....  | 78        |
| 2.7.3 Balance Hídrico en la Cuenca Quilca-Vitor-Chili.....  | 80        |
| 2.7.4 Balance Hídrico en la Cuenca Siguas.....  | 81        |
| <b>2.8 Distribución de la Percolación y la Recarga .....</b>  | <b>83</b> |
| 2.8.1 Distribución de la Percolación en el Área de Estudio .....  | 83        |
| 2.8.2 Distribución de la Recarga en el Área de Estudio .....  | 85        |
| <b>3 Descripción del Centro Laboral.....</b>  | <b>87</b> |
| <b>3.1 Razón Social:.....</b>   | <b>87</b> |
| <b>HydroTerra S.A.C.....</b>  | <b>87</b> |
| 3.1.1 Estructura Organizacional:.....   | 87        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 1.2.      | Número de trabajadores en el área de trabajo: 5 .....                   | 87         |
| 1.3.      | Cargo que desempeña: <b>Hidrólogo Principal</b> .....                   | 87         |
| <b>4</b>  | <b>Descripción de las funciones desempeñadas.</b> .....                 | <b>89</b>  |
| <b>5</b>  | <b>Descripción de situaciones problemáticas.</b> .....                  | <b>91</b>  |
| <b>6</b>  | <b>Contribución en la solución de cada situación problemática</b> ..... | <b>92</b>  |
| <b>7</b>  | <b>Análisis de la contribución: Competencias y Habilidades</b> .....    | <b>96</b>  |
| <b>8</b>  | <b>Beneficio obtenido por el Centro Laboral</b> .....                   | <b>98</b>  |
| <b>9</b>  | <b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....                             | <b>100</b> |
| <b>10</b> | <b>Referencias bibliográficas</b> .....                                 | <b>103</b> |

## *Índice de tablas*

|          | Página  |
|----------|---|
| Tabla 1  | Coordenadas de ubicación de las cuencas Camaná-Majes-Colca .....5   |
| Tabla 2  | Estaciones Pluviométricas Operadas por el SENAMHI..... 13   |
| Tabla 3  | Principales Parámetros de Crítica de Datos ..... 14   |
| Tabla 4  | Resumen de los Indicadores Estadísticos más Importantes para la Comparación de las Series de Tiempo Completas (época seca y húmeda)..... 21 |
| Tabla 5  | Resumen de los Indicadores Estadísticos más Importantes para la Comparación de las Series de Tiempo Completas (época húmeda)..... 22        |
| Tabla 6  | Coordenadas de las Estaciones Virtuales en las Zonas de Estudio Hidrológico ..... 22  |
| Tabla 7  | Precipitaciones (mm) Promedio Mensuales (1998-2017) ..... 24  |
| Tabla 8  | Ubicación de las Estaciones Climáticas de la NASA utilizadas..... 31  |
| Tabla 9  | Curva Hipsométrica de la Cuenca Camaná ..... 41   |
| Tabla 10 | Curva Hipsométrica de la Cuenca Quilca-Vitor-Chili..... 44  |
| Tabla 11 | Curva Hipsométrica de la Cuenca Siguas ..... 46   |
| Tabla 12 | Parámetros Morfológicos de las Cuencas Camaná-Majes-Colca, Quilca-Vitor-Chili y Siguas ..... 49   |
| Tabla 13 | Tiempo de concentración de las cuencas de estudio..... 49   |
| Tabla 14 | Características Hidrológicas de los Tipos de Suelos Derivados en Base a la Información Geológica del Área..... 60                           |
| Tabla 15 | Parámetros de la Vegetación Según el Tipo de Uso de Suelo ..... 62  |
| Tabla 16 | Ubicación de Estación Hidrométrica Utilizada para la Validación ..... 67  |
| Tabla 17 | Caudales Históricos de la Estación Hidrométrica Huatiapa ..... 67   |
| Tabla 18 | Indicadores de la Bondad de Ajuste para la Simulación Hidrológica con el Modelo SWAT en la Estación Hidrométrica Huatiapa ..... 70          |
| Tabla 19 | Resumen del Balance Hídrico en la Zona de Análisis Hidrológico ..... 76   |
| Tabla 20 | Balance Hídrico Promedio Mensual Multianual en la Zona de Estudio (mm)..... 77  |
| Tabla 21 | Balance Hídrico Promedio Mensual Multianual en la Cuenca Camaná (mm)..... 79  |
| Tabla 22 | Balance Hídrico Promedio Mensual Multianual en la Cuenca Quilca-Vitor-Chili (mm) ..... 80   |
| Tabla 23 | Balance Hídrico Promedio Mensual Multianual en la Cuenca Siguas (mm) ..... 82   |

## *Índice de figuras*

|           |   | Página |
|-----------|---|--------|
| Figura 1  | Zona de Estudio .....   | 4      |
| Figura 2  | Topología simplificada de los trasvases Chili Regulado y Colca-Siguas.....                                    | 9      |
| Figura 3  | Análisis de Confianza – Índices Anuales .....   | 15     |
| Figura 4  | Análisis de Confianza – Suma de Índices Anuales .....   | 15     |
| Figura 5  | Precipitación Mensual en las Estaciones Regionales del SENAMHI<br>Cercanas al Área de Estudio .....           | 16     |
| Figura 6  | Precipitación Anual en las Estaciones Regionales del SENAMHI Cercanas<br>al Área de Estudio.....              | 16     |
| Figura 7  | Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM<br>Chivay, Periodo (1998-2014) .....          | 18     |
| Figura 8  | Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM<br>Chiguata, Periodo (1998-2014) .....        | 18     |
| Figura 9  | Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM El<br>Frayle, Periodo (1998-2014).....        | 19     |
| Figura 10 | Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM<br>Huambo, Periodo (1998-2014) .....          | 19     |
| Figura 11 | Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM<br>Madrigal, Periodo (1998-2014) .....        | 20     |
| Figura 12 | Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM<br>Pillones, Periodo (1998-2014) .....        | 20     |
| Figura 13 | Precipitación (mm) Promedio Mensual (enero 1998 – marzo 2017) en la<br>Cuenca Camaná-Majes-Colca .....        | 26     |
| Figura 14 | Precipitación (mm) Promedio Mensual (enero 1998 – marzo 2017) en la<br>Cuenca Quilca – Vitor Chili .....      | 26     |
| Figura 15 | Precipitación Anual (mm/año) de las Estaciones Virtuales (1998-2017) de la<br>cuenca Camaná-Majes-Colca ..... | 28     |
| Figura 16 | Precipitación Anual (mm/año) de las Estaciones Virtuales (1998-2017) de la<br>cuenca Quilca-Vitor-Chili ..... | 29     |
| Figura 17 | Distribución de la precipitación y ubicación de estaciones TRMM.....  | 30     |
| Figura 18 | Ubicación de Estaciones Meteorológicas NASA .....   | 33     |
| Figura 19 | Radiación Promedio Mensual en la parte Alta de la Zona de Estudio<br>Hidrológico .....                        | 34     |
| Figura 20 | Radiación Promedio Mensual en la parte Baja de la Zona de Estudio<br>Hidrológico .....                        | 34     |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 21 | Temperatura Mínima Promedio Mensual en la parte Alta de la Zona de Estudio Hidrológico.....                                 | 35 |
| Figura 22 | Temperatura Mínima Promedio Mensual en la parte Baja de la Zona de Estudio Hidrológico.....                                 | 35 |
| Figura 23 | Temperatura Máxima Promedio Mensual en la parte Alta de la Zona de Estudio Hidrológico.....                                 | 36 |
| Figura 24 | Temperatura Máxima Promedio Mensual en la parte Baja de la Zona de Estudio hidrológico.....                                 | 36 |
| Figura 25 | Humedad Relativa Promedio Mensual en la parte Alta de la zona de Estudio Hidrológico.....                                   | 37 |
| Figura 26 | Humedad Relativa Promedio Mensual en la parte Baja de la Zona de Estudio Hidrológico.....                                   | 37 |
| Figura 27 | Velocidad del Viento Promedio Mensual en la parte Alta de la Zona de Estudio Hidrológico.....                               | 38 |
| Figura 28 | Velocidad del Viento Promedio Mensual en la parte Baja de la Zona de Estudio Hidrológico.....                               | 39 |
| Figura 29 | Hidrografía Regional.....   | 40 |
| Figura 30 | Curva Hipsométrica de la Cuenca Camaná-Majes-Colca.....   | 43 |
| Figura 31 | Curva Hipsométrica de la Cuenca Quilca-Vitor-Chili.....   | 45 |
| Figura 32 | Curva Hipsométrica de la Cuenca Siguas.....   | 47 |
| Figura 33 | Perfil Longitudinal del río Camaná.....   | 51 |
| Figura 34 | Perfil Longitudinal del río Majes.....  | 51 |
| Figura 35 | Perfil Longitudinal del río Colca.....  | 51 |
| Figura 36 | Perfil Longitudinal del río Quilca.....   | 52 |
| Figura 37 | Perfil Longitudinal del río Vitor.....  | 52 |
| Figura 38 | Perfil Longitudinal del río Chili.....  | 52 |
| Figura 39 | Perfil Longitudinal del río Siguas.....   | 52 |
| Figura 40 | Distribución de las Zonas de Vida.....  | 54 |
| Figura 41 | Ubicación de cuencas modeladas.....   | 59 |
| Figura 42 | Mapa de Distribución de Suelos.....   | 61 |
| Figura 43 | Mapa de Distribución de los Usos de Suelo.....  | 64 |
| Figura 44 | Mapa de distribución de Pendientes.....   | 66 |
| Figura 45 | Caudales Simulados por el Modelo Hidrológico SWAT vs Caudales Observados en la Estación Huatiapa (ene 1998 – dic 2014)..... | 69 |
| Figura 46 | Caudal Promedio Mensual (m <sup>3</sup> /s) en la Cuenca Camaná (1998 – 2017).....  | 71 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 47 | Caudal Promedio Mensual ( $m^3/s$ ) Multianual en la Cuenca Camaná (1998–2017) .....                           | 72 |
| Figura 48 | Caudal Promedio Mensual ( $m^3/s$ ) en la Cuenca Quilca-Vitor-Chili (1998 – 2017) .....                        | 73 |
| Figura 49 | Caudal Promedio Mensual ( $m^3/s$ ) Multianual en la Cuenca Quilca-Vitor-Chili (1998–2017).....                | 73 |
| Figura 50 | Caudal Promedio Mensual ( $m^3/s$ ) en la Cuenca Sigwas (1998 – 2017).....                                     | 74 |
| Figura 51 | Caudal Promedio Mensual ( $m^3/s$ ) Multianual en la Cuenca Sigwas (1998–2017) .....                           | 75 |
| Figura 52 | Balance Hídrico General del Área de Estudio .....  | 76 |
| Figura 53 | Relación Precipitación Escorrentía a Nivel Mensual en la Zona de Estudio (ene 1998 – mar 2017) .....           | 78 |
| Figura 54 | Relación Precipitación Escorrentía a Nivel Mensual en la Cuenca Camaná (ene 1998 – mar 2017) .....             | 79 |
| Figura 55 | Relación Precipitación Escorrentía a Nivel Mensual en la Cuenca Quilca-Vitor-Chili (ene 1998 – mar 2017) ..... | 81 |
| Figura 56 | Relación Precipitación Escorrentía a Nivel Mensual en la Cuenca Sigwas (ene 1998 – mar 2017) .....             | 82 |
| Figura 57 | Distribución de la Percolación Promedio Anual .....  | 84 |
| Figura 58 | Distribución de la Recarga Promedio Anual .....  | 86 |
| Figura 59 | Comparación de la precipitación del TRMM del 7/03/2016 y la procesada por HydroTerra a $1\text{ km}^2$ .....   | 94 |
| Figura 60 | Precipitación Promedio Mensual de 1998 al 2015 para todo el país a $1\text{ km}^2$ de resolución. ....         | 95 |

# **1 ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS CAMANÁ, MAJES, SIHUAS, QUILCA-VITTOR-CHILI CON INFORMACIÓN SATELITAL.**

## **1.1 ANTECEDENTES**

Uno de los mayores problemas que se tiene en el Perú es el de no contar con datos hidrometeorológicos (principalmente precipitación y caudales) confiables y suficientes. Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), las redes hidrométricas y meteorológicas se encuentran en un estado variable de mantenimiento en función de su situación y del gestor responsable de su operación [ANA, Proyectos Especiales, SENAMHI, Juntas de Usuarios de Riego y otras instituciones]. Estas estaciones miden variables hidrometeorológicas de frecuencia mínima diaria y tiene registros de diferente longitud, lo que da series muy variables en cuanto a la temporalidad. Por otro lado, la densidad y número de estaciones existentes es insuficiente en el marco nacional y más aún, estando estas concentradas principalmente en la zona de la costa del país, donde existe el porcentaje más alto de infraestructura de medición y control, pero donde paralelamente los registros pluviométricos son escasos. Similares condiciones tenemos en términos de información edafológica y de vegetación.

Esta Memoria de Suficiencia Profesional presente la hidrología satelital con el fin de superar los problemas que representa la falta de datos de precipitación para la evaluación de recursos hídricos en el Perú. Para demostrar las bondades de esta tecnología y metodología se ha procedido a evaluar las cuencas de los ríos Camaná, Majes, Sihuas, Vittor – Chili.

El primer producto que pondremos al servicio de esta memoria es la elaboración de los campos de precipitación diaria para cada km<sup>2</sup> de las cuencas del estudio.

Los campos de precipitación, a resolución de (1km\*1km), se obtendrán procesando la información del satélite TRMM de una resolución de (25km \* 25km). La metodología utilizada ha sido probada tanto en Europa como en Asia y sus resultados se han publicado en revistas científicas especializados. Los campos de precipitación obtenidos para el Perú han sido comparados con los datos de estaciones meteorológicas del SENAMHI en diferentes zonas del país con resultados muy satisfactorios.

Luego, se realizará un estudio hidrológico que permita hacer una descripción cualitativa y cuantitativa con relación al funcionamiento hidrológico actual que se establecerá para cada

(sub)cuenca. El resultado de la comparación permitirá plantear y diseñar una serie de planes de manejo más eficaces para las industrias en la zona.

Las características de este estudio y sus objetivos requieren, para el análisis, el uso de modelos hidrológicos con características específicas, entre las más resaltantes tenemos

- Modelos de representación física de los procesos (evapotranspiración, escorrentía superficial, infiltración y recarga de acuíferos, etc.).
- Estimación de balance de aguas a nivel puntual y espacial (por cuencas y sub-cuencas) que tenga en cuenta la combinación de suelos, vegetación y variabilidad climática.
- Balances mensuales y anuales.
- Flujos de agua que se puedan desplazar de canales a reservorios y/o viceversa.

Para estudiar la hidrología de la cuenca se hará uso del Modelo “Soil Water Assessment Tool” (SWAT) cuyo diseño está basado en relaciones físicas y supuestos que son aplicables a la región de Sur del país por su ubicación, geografía, morfología y clima.



## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 GENERALES**

El objetivo del presente estudio es la elaboración de la Línea Base Hidrológica completa de las cuencas de estudio, para ello se seguirán los lineamientos exigidos por la autoridad SENACE y por La Autoridad Nacional del Agua - ANA.

### **1.2.2 ESPECÍFICOS**

Entre los objetivos más importantes tenemos:

- Estudio hidrológico detallado de las cuencas regionales Camaná-Majes-Colca, Quilca-Vitor-Chili y Siguan, en diferentes escenarios y épocas de avenidas.
- Determinar los parámetros fisiográficos más importantes y asociarlas a sus relaciones hidrológicas.
- Influencia del Fenómeno del Niño en la zona de estudio hidrológico.
- Calcular las principales componentes del balance hídrico de las cuencas regionales dentro del área de estudio hidrológico.

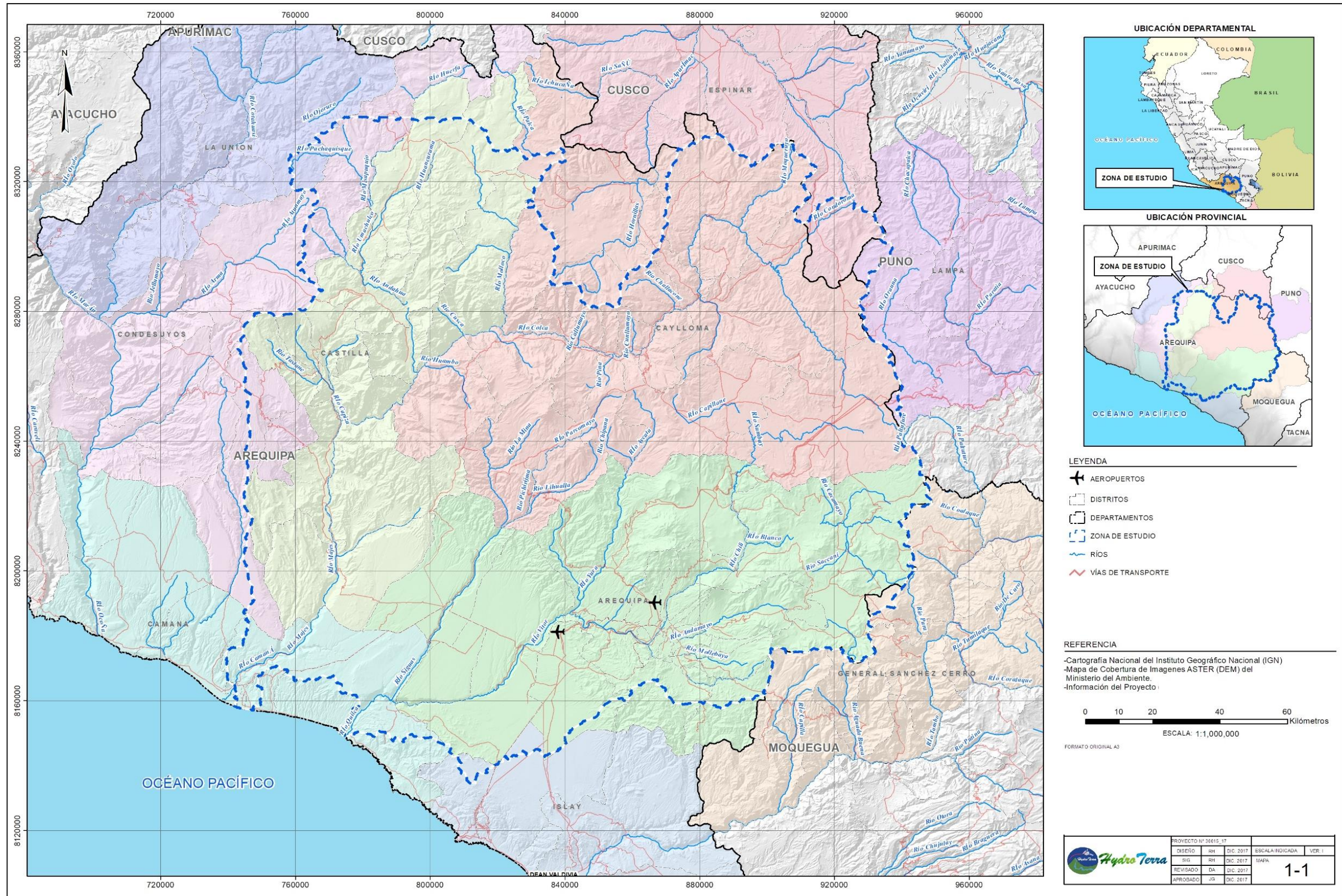


Figura 1 Zona de Estudio

## 2 CUERPO DEL TRABAJO

### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO.

#### Cuenca Camaná-Majes-Colca

La siguiente descripción de la cuenca procede del estudio titulado Evaluación de Recursos Hídricos en la cuenca Camaná-Majes-Colca realizado en noviembre del 2015 por INCLAM para el ANA.

La cuenca Camaná-Majes-Colca limita al N con las cuencas Pucara (UH 018) y Alto Ucayali (UH 4998); al S con la cuenca Quilca-Vítor-Chili (UH 132), la intercuenca 133 y el Océano Pacífico; al E con las cuencas Quilca-Vítor-Chili (UH132), Tambo (UH 1318) y Coata (UH 0176).

La cuenca Camaná-Majes-Colca (unidad hidrográfica 134) tiene una extensión de 17,152.73 km<sup>2</sup> y se ubica en la parte S de la costa del Perú, en la vertiente Pacífica, entre las coordenadas geográficas que se indican en la siguiente tabla:

**Tabla 1** Coordenadas de ubicación de las cuencas Camaná-Majes-Colca

| Sistemas                | Datum                        | Componentes    | Valor       |             |
|-------------------------|------------------------------|----------------|-------------|-------------|
|                         |                              |                | Mínimo      | Máximo      |
| Coordenadas Geográficas | Horizontal WGS 84            | Longitud Oeste | 70° 53' 5"  | 72° 44' 6"  |
|                         |                              | Latitud Sur    | 14° 55' 50" | 16° 37' 59" |
| Coordenadas             | Horizontal WGS 84            | Metros Este    | 737 940     | 821 990     |
| UTM Zona 18             |                              | Metros Norte   | 8 159 678   | 8 347 644   |
| Altitud                 | Vertical Nivel Medio del mar | msnm           | 0           | 6398        |

FUENTE: INCLAM, 2015

Políticamente ocupa los distritos de José María Quimper, Mariscal Cáceres, Nicolás de Piérola, Quilca y Samuel Pastor, en la provincia de Camaná; los distritos de Aplao, Andagua, Ayo, Chachas, Chilcaymarca, Choco, Huancarqui, Machaguay, Orcopampa, Pampacolca, Tipán, Uñon, Uraca y Viraco, en la provincia de Castilla; Chivay, Achoma, Cabanaconde, Callalli, Caylloma, Coporaque, Huambo, Ichupampa, Lari, Lluta, Maca, Madrigal, San Antonio de Chuca, Sibayo, Tapay, Tisco, Tuti, Yanque y Majes, en la provincia de Caylloma; los distritos de Chuquibamba, Andaray, Cayarani, Iray y Salamanca, en la provincia de Condesuyos; y el distrito de Puyca, en la provincia de La Unión, todos ellos en el

departamento de Arequipa. Además, ocupa el distrito de Condoroma, en la provincia de Espinar del departamento de Cusco; así como el distrito de Santa Lucía, en la provincia de Lampa, del departamento de Puno.

EL ámbito de la cuenca del río Camaná-Majes-Colca está comprendido principalmente en el Departamento de Arequipa, aunque también incluye un pequeño sector del S del Departamento de Cusco y O de Puno. Está ubicada en la parte occidental de la Cordillera de Los Andes, y consecuentemente pertenece a la vertiente del Océano Pacífico. El río Colca junto con el río Molloco y otros afluentes menores forman el río Majes que desemboca en el Océano Pacífico con el nombre de Camaná. Sus principales tributarios son:

- Por la margen derecha: Antasalla, Blanquillo, Negrillo, Condoroma, Maqueruyo, Chalhuanca, Molloco, Andahua, Capiza, Río Grande y Puluvinas.
- Por la margen Izquierda: Callalli-Llapa, Hualca Hualca y Huambo.

Las partes más altas de la cuenca se desarrollan en el sector occidental de la cordillera de Los Andes, donde se ubican obras de regulación y trasvase que sirven al Proyecto Majes Siguan, y al Sistema Chili Regulado. En la parte alta de la cuenca, se desarrolla pastizales, que son el soporte de una economía basada en la explotación de los camélidos sudamericanos. En las partes media alta y baja se ubican los valles interandinos y pampas costaneras, en donde se desarrolla gran parte de la agricultura. El cauce principal nace con el nombre de río Colca, en la parte media toma el nombre de Majes para desembocar en el Océano Pacífico con el nombre de Camaná.

El río Colca, tiene su origen en las alturas del cerro Yanasalla, en la provincia de Caylloma del departamento de Arequipa, a una elevación de 4 886 msnm, en el límite con el departamento de Puno. Alimentado su curso de agua primordialmente con las precipitaciones que caen en las alturas del flanco occidental de la Cordillera de los Andes.

El río Colca, que en sus nacientes tiene un curso divagante, recibe una serie de afluentes, siendo el mayor, el río Negrillo. Aguas abajo recibe las aguas del río Acopunco y a partir de esta confluencia cambia de rumbo y se dirige a Chivay, donde varía nuevamente de dirección, formando un importante valle agrícola entre los 3 651 msnm (Chivay) y los 2 219 msnm (confluencia con el río Huaru Rumi). Concluye el valle agrícola y el Colca, forma un largo y

profundo cañón, hasta confluir con el río Capiza, donde una vez cambia de rumbo y de nombre.

Esta parte de la cuenca es de fondo profundo y quebrado y de fuertes pendientes encontrándose limitada por una cadena de cerros, que, en dirección al Océano Pacífico, muestra un descenso sostenido y rápido de nivel de cumbres; presenta, en su parte inferior, cierto número de lagunas, entre las cuales debe mencionarse las de Arcata, Huisca Huisca, Mamacocha, Chilacocha, Sammaccota y Mucurca.

El río Majes se forma por la confluencia de los ríos Colca y Capiza y termina en la zona de Palo Parado, donde cambia de nombre a Camaná. En su recorrido de aproximadamente 77 km, tiene como afluente importante al Río Huario, en su margen derecha; además de varias quebradas, de escurrimiento eventual, destacándose la de Cosos, en su margen derecha, y la de Sicera o Pedregal, en la margen izquierda. Su cuenca tiene una extensión aproximada de 1 690 km<sup>2</sup>.

El río Camaná, toma este nombre a partir del lugar denominado Palo Parado, y tiene como afluentes, en la margen derecha, a la quebrada de Pacayura y en la margen izquierda, a la quebrada de Molles, que comprende la Pampa de Majes (ALA Colca Sigvas Chivay, 2014a; ATDR Camaná-Majes, 2004c).

Siguiendo la descripción del Diagnóstico de la Gestión de la Oferta de esta cuenca (AUTODEMA, 2001) se pueden distinguir tres sectores diferenciados:

La cuenca alta del río Colca, cuyas aguas son administradas por la ALA Chili, tiene un área de 737 km<sup>2</sup> aproximadamente. El río Colca, tiene su origen en las alturas del cerro Yanasalla (4 886 msnm) y se alimenta primordialmente con las precipitaciones del flanco occidental de la Cordillera de los Andes. Se encuentra ubicada en la unidad hidrográfica 1349.

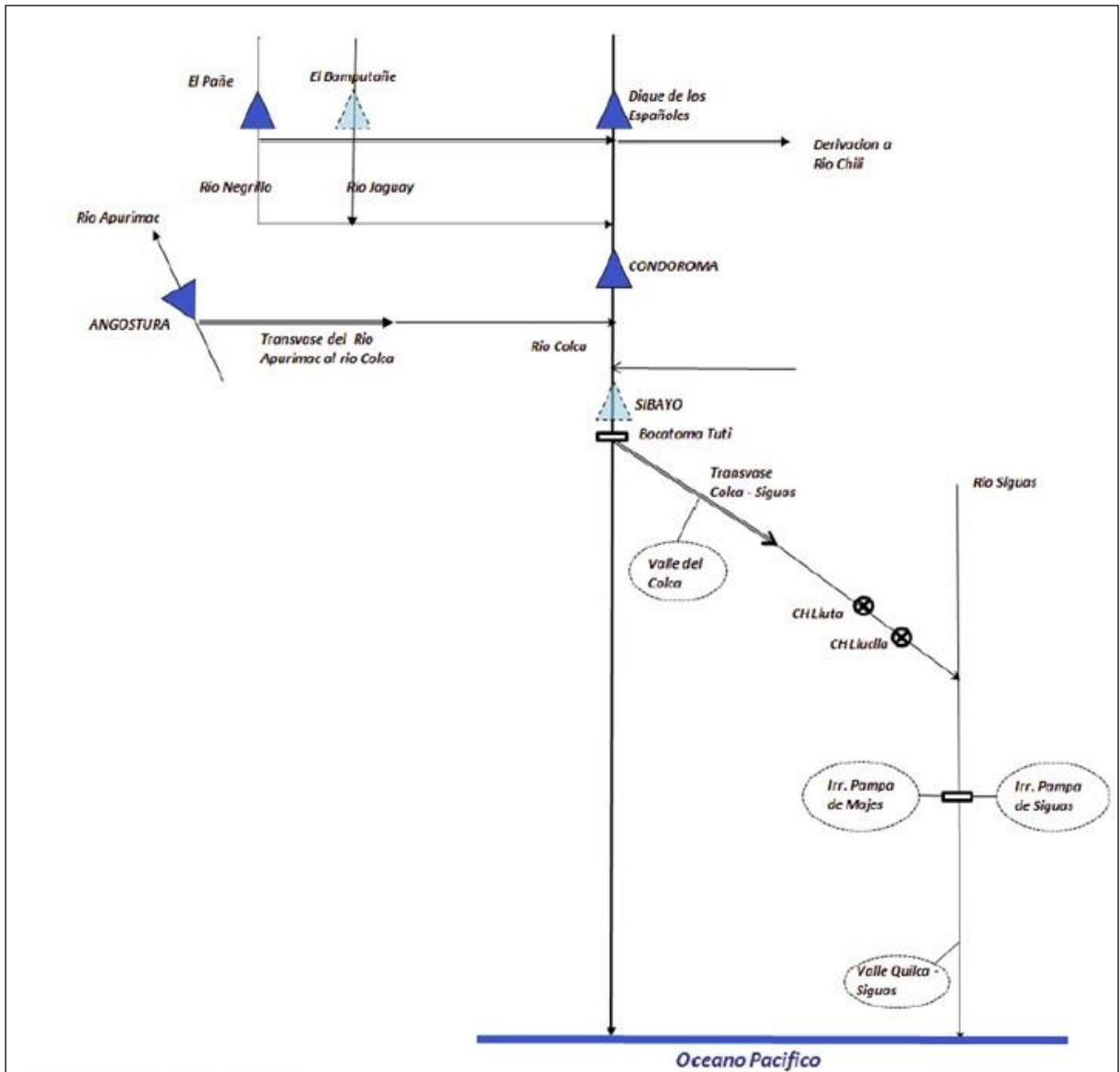
El río Colca, que en sus nacientes tiene un curso divagante, recibe una serie de afluentes, siendo el mayor, el río Negrillo. Tiene una forma más angosta en sus nacientes mientras que en su parte más baja el ensanchamiento es mayor. En esta zona los recursos están regulados mediante los embalses de El Pañe, Bamputañe y Dique de los Españoles, cuyas aguas son parcialmente derivadas a través del Canal Pañe-Sumbay y un sistema de captaciones (bocatomas Blanquillo, Jancolacaya y Antasalla) y posteriormente trasvasadas al río Sumbay

(en la cuenca Quilca-Vitor-Chili), a la altura del poblado de Imata. Este sistema de trasvase forma parte del sistema regulado Chili.

Aguas abajo de la confluencia del Colca con el Negrillo se ubica la represa de Condorama, que regula las aguas del río Colca para su posterior trasvase mediante una aducción desde la bocatoma de Tuti hasta la quebrada Huasamayo, en Querque (cuenca Quilca-Vitor-Chili), a través de un sistema de 88 km de túneles y 13 km de canales, formando parte del sistema regulado Colca.

Más adelante, el río Colca recibe las aguas del río Acopunco y a partir de esta confluencia cambia de rumbo y se dirige a Chivay, donde varía nuevamente de dirección, formando un importante valle agrícola entre los 3 651 msnm de Chivay y los 2 219 msnm en la confluencia con el río Huaru Rumi. Concluye el valle agrícola y el Colca, forma un largo y profundo cañón, hasta confluir con el río Capiza, donde una vez cambia de rumbo y de nombre.

Esta parte de la sub cuenca, es de fondo profundo y quebrado y de fuertes pendientes encontrándose limitada por una cadena de cerros, que, en dirección al Océano Pacífico, muestra un descenso sostenido y rápido de nivel de cumbres; presenta, en su parte inferior, cierto número de lagunas, entre las cuales debe mencionarse las de Arcata, Huisca Huisca, Mamacocha, Chilacocha, Sammaccota y Mucurca.



FUENTE: AUTODEMA 2010.

**Figura 2 Topología simplificada de los trasvases Chile Regulado y Colca-Siguas**

El río Molloco (unidad hidrográfica 1348), tributario del Colca por la margen derecha, tiene su origen en una serie de lagunas ubicadas en la parte N de la cuenca, aproximadamente en la cota 5 635 msnm: Machuchcha, Llaygua y Almillá. Este río discurre en una dirección aproximada de N a S hasta su confluencia con el río Colca, y los cursos principales que lo originan son los ríos Esquina, Canloyocmayo y Llactatuyo. Aguas abajo de la confluencia de estos ríos, el río Molloco toma el nombre de Iligua, y recibe los aportes de algunos ríos y quebradas pequeñas, entre los cuales destaca el río Huaycaymayo, María Pérez y Sillque. A partir de la cota 4 200 msnm, el río empieza a adquirir una gran pendiente en el cañón del

Huaruro, hasta la confluencia con el Colca, en los 2 070 msnm. Esta subcuenca tiene una extensión de 1 578,08 km<sup>2</sup>.

El río Capiza (unidad hidrográfica 1344) está conformado por la unión de los ríos Tipan y Tapaza. Nace de la conformación del río Yato con el río Llacllajo. El río Yato tiene su nacimiento en las estribaciones del Coropuna y en su recorrido, por la cota 3 150 msnm, se encuentra ubicada la toma de Antaura, que riega la mayor parte de la campiña de Pampacolca. El río Llacllaco nace aproximadamente en la cota 5 000 msnm, en las estribaciones del nevado Coropuna, recibe en su trayecto las aguas de la quebrada de Cospanaja. Otro afluente importante del río Capiza, es el río Taparza, que cuenta con una cuenca relativamente grande, pues abarca los distritos de Machahuay y La Unión. El área de la subcuenca es de 837,25 km<sup>2</sup>.

Aguas abajo, con la confluencia de los ríos Colca y Capiza se forma el río Majes, en la zona de Andamayo, en la cota 910 msnm, y termina en la zona de Palo Parado, con un recorrido de aproximadamente 77 km en los que recibe como afluente importante al río Huario o Grande en su margen derecha, además de varias quebradas, de escurrimiento eventual, destacándose la de Cosos en su margen derecha y la de Sicera o Pedregal en su margen izquierda.

La cuenca del Majes (unidad hidrográfica 1343) tiene una extensión de 2 114,78 km<sup>2</sup>, pero no tiene ninguna relevancia como aportante hídrico. En ambas márgenes se ubican 18 tomas, todas rústicas, que permiten el riego de todas las áreas de cultivo del valle. El comportamiento estacional del río Majes, está directamente vinculado al comportamiento de las precipitaciones que se suscitan en su cuenca alta, cuyo régimen anual se divide en cuatro períodos, que conforman un ciclo anual en las variaciones: un período de avenidas que se produce generalmente en los meses de verano con una permanencia de 3 meses, un período de estiaje de 5,5 meses y dos períodos transicionales entre los anteriores de 2 y 1,5 meses respectivamente (ONERN, 1973).

El río Majes recibe los aportes del río Huario o Grande, que tiene sus nacimientos aproximadamente a los 4 500 msnm, donde es denominado río Blanco. En su curso tiene pocos afluentes de importancia, destacándose la quebrada de San Francisco. Su longitud aproximada desde su nacimiento es de 52 km y su área de aportación solamente alcanza 422,40 km<sup>2</sup>, de los cuales solamente un 50% corresponde a zona húmeda en la estación de verano.



A partir del sector de Palo Parado, toma el nombre de río Camaná, y recibe como tributarios a la quebrada de Pacayura por la margen derecha –cuya naciente corresponde a una altitud de 3 000 msnm y es adyacente a la de río Grande (Chuquibamba)— y la quebrada de Molles por la margen izquierda, que comprende la Pampa de Majes, donde se ubican los asentamientos desarrollados del Proyecto Especial Majes Siguas.

La subcuenca de la quebrada de Pacayura es insignificante en su aporte hídrico; y sólo aporta en el período de lluvias (Diciembre-Marzo). Esta quebrada confluye con el río Camaná en el lugar denominado Sonay. La diferencia real en el aforo o descarga del río Majes entre la Estación Huatiapa o Puente Huancarqui y la del río Camaná, Estación Puente Carretera, sólo puede atribuirse a esta quebrada durante el período de lluvias o avenidas; cualquier otra diferencia es atribuible a los métodos y/o procedimientos de aforo.

La quebrada de Molles (unidad hidrográfica 1342) confluye en el río Camaná en el tramo denominado Socco, aguas arriba de la confluencia de la quebrada de Pacayura; tiene como ámbito o territorio la Pampa de Majes donde se desarrolla la primera etapa o etapa actual del Proyecto Majes-Siguas. Esta quebrada está conformada también por la quebrada de Hospicio o del Espíritu Santo que en la Pampa de Majes próxima al área agrícola no tiene mayor cauce; sin embargo, en la cabecera de la pampa tiene cauce y profundidad considerables; incluso para el cruce del canal lateral 1R, que es el primero o ubicado en la parte más elevada de la pampa, ha sido necesaria la construcción de una estructura especial, como es el sifón Hospicio; de gran dimensión. Esta última quebrada tiene una altitud máxima de 2 000 msnm por lo que no tiene aporte hídrico.

Ya en el Bajo Camaná es donde se ubica la zona agrícola del valle que se extiende hacia el NO en dirección a Pucchún, y el río desemboca en el océano Pacífico.

El ámbito de la cuenca Camaná-Majes-Colca se caracteriza por presentar sectores que utilizan recursos hídricos del Proyecto Especial Majes Siguas. Son atendidos por este proyecto, algunos sectores del Valle del Colca, la Irrigación Majes, el Valle de Siguas y la Irrigación Santa Rita de Siguas. Otros sectores, tales como la mayor parte del Valle del Colca, los sectores del Majes Intermedio, el Valle de Camaná y la parte alta de la cuenca Siguas, son atendidos con recursos hídricos propios.

La construcción del Proyecto Especial Majes-Siguas fue prevista en dos etapas, la primera de las cuales ya concluyó y comprendió la construcción de la Presa Condoroma (285 MMC),

aducción Colca-Siguas, bocatoma de Pitay, derivación Pitay-pampas de Siguas, canal madre para las pampas de Majes y redes de distribución, previéndose para esta primera etapa el riego de 26 258 ha.

En general, la infraestructura actualmente construida puede dividirse en tres subsistemas (AUTODEMA, 2001)

- Sub Sistema Condoroma
- Sub Sistema Aducción Tuti-Túnel Terminal
- Sub Sistema de Derivación Pitay-Majes

El Sistema hidráulico del Proyecto Majes-Siguas se inicia en la represa de Condoroma ubicada en las partes altas de la cuenca del río Colca, con en el que se garantiza la disponibilidad de agua a razón de 12 m<sup>3</sup>/s de mayo a diciembre. La presa de Condoroma es una presa de enrocado ubicada sobre el río Colca, cuyo volumen de embalse es 285 MMC de los cuales 250 MMC corresponden a su volumen útil.

El agua embalsada es regulada y derivada al río Colca, por donde se desplaza hasta la bocatoma Tuti. La bocatoma de Tuti, es una presa derivadora, cuyo barraje cruza el río Colca y eleva el nivel de agua hasta la cota 3 745 msnm. La obra de toma está ubicada al lado izquierdo de la presa.

Posteriormente, el agua es derivada hacia el Canal de Aducción, incorporando además de los recursos regulados en la presa de Condoroma los recursos de la cuenca intermedia del Colca. Tiene una capacidad de 34 m<sup>3</sup>/s y un total de 88,19 km de túneles y 12 km de canales, al final de los que se ubica el túnel terminal con una longitud de 15,20 km. El canal se desplaza por la margen izquierda del río Colca, cerca al pueblo de Huambo; a partir de este lugar el agua es trasvasada, a través del túnel terminal, a la quebrada de Huasamayo cerca al pueblo de Querque, ya en la cuenca Quilca-Vitor-Chili. El agua es conducida por la mencionada quebrada después de su confluencia con el río Siguas.

Ya en el tramo medio de la cuenca Siguas, el agua es captada por la bocatoma de Pitay y es conducida por el canal de Derivación, ubicado en la margen derecha internándose en la Pampa de Majes; y a la altura de la derivación del canal 1R, toma el nombre de Canal Madre,

cruzando posteriormente la carretera Panamericana, cerca al sector Alto Sigwas y continúa en forma paralela a la misma hasta la estructura terminal.

La operación del este sistema, al igual que el sistema regulado Chili, está a cargo de la Autoridad Autónoma de Majes (AUTODEMA), del Gobierno Regional de Arequipa.

## 2.2 PRECIPITACIÓN

### 2.2.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DEL VECTOR REGIONAL.

El análisis exploratorio con el método del Vector Regional de Índices Pluviométricos (MVR), indica que las estaciones Huambo, Madrigal y Chivay localizadas en las cuencas Camaná y las estaciones Pillones, Chiguata y El Frayle localizadas en la cuenca Quilca-Vitor Chili obtienen una correlación alta con respecto al Vector Regional, además de valores homogéneos que indicarán que tienen un mismo régimen multianual.

En la **Tabla 2** se puede revisar las coordenadas de las estaciones de SENAMHI.

**Tabla 2 Estaciones Pluviométricas Operadas por el SENAMHI**

| <i>Estación</i> | <i>Este (m)</i> | <i>Norte (m)</i> | <i>Altitud (msnm)</i> | <i>Departamento</i> | <i>Provincia</i> | <i>Distrito</i>      |
|-----------------|-----------------|------------------|-----------------------|---------------------|------------------|----------------------|
| Huambo          | 810055.0        | 8258591.3        | 3319                  | Arequipa            | Caylloma         | Huambo               |
| Madrigal        | 842467.3        | 8271633.4        | 3276                  | Arequipa            | Caylloma         | Madrigal             |
| Chivay          | 864417.8        | 8267784.4        | 3644                  | Arequipa            | Caylloma         | Chivay               |
| Pillones        | 905436.6        | 8229738.6        | 4455                  | Arequipa            | Caylloma         | San Antonio de Chuca |
| El Frayle       | 907667.6        | 8210173.9        | 4121                  | Arequipa            | Arequipa         | San Juan de Tarucani |
| Chiguata        | 883585.5        | 8182713.3        | 2902                  | Arequipa            | Arequipa         | Chiguata             |

*FUENTE: SENAMHI, Coordenadas UTM WGS 18S*

Con la data histórica de las estaciones de SENAMHI, se realizó el análisis exploratorio aplicando el método del Vector Regional de Índices Pluviométricas (MVR), ejecutando el programa de computo HYDRACCESS (Vauchel, 2004). El MVR, es un método de crítica de datos (G. Hiez, 1977 y Brunet Moret, 1979).

Con el método se determinó la calidad de los datos de cada estación, basado en los resultados de los parámetros como:

- La Desviación Standard de los Desvíos (D.E.D), compara la desviación de una estación respecto al vector.
- Correlación entre la estación y el vector.
- Gráfico de índices anuales del vector y gráficos acumulados.

La aplicación del MVR fue realizada para las estaciones indicadas anteriormente, pues ellas tienen un periodo mayor de 25 años de data histórica. Después de la aplicación del método MVR, se obtuvo los resultados mostrados en la **Tabla 3**.

**Tabla 3 Principales Parámetros de Crítica de Datos**

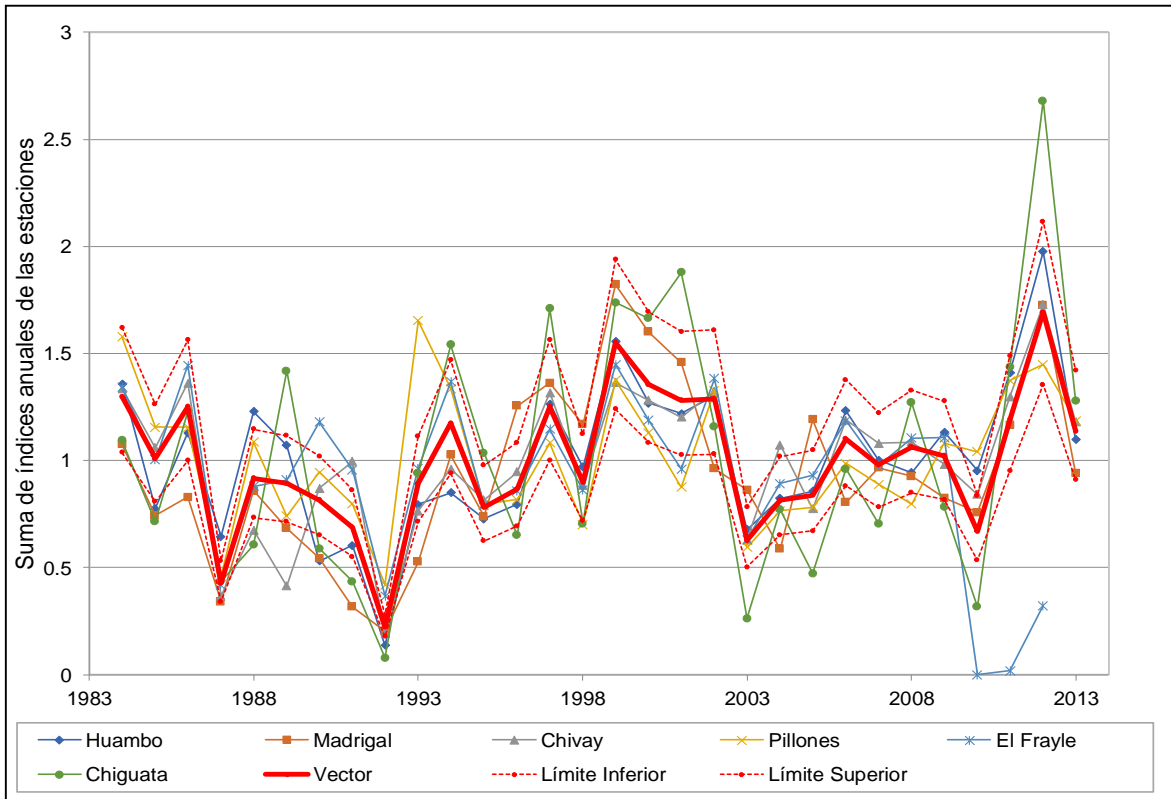
| <i>Estación</i> | <i>N° Años</i> | <i>D.E. Obs.</i> | <i>Coef. Variación</i> | <i>D.E. Desvíos</i> | <i>Homogeneidad B.M.</i> | <i>Correl. /Vector</i> |
|-----------------|----------------|------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|
| Huambo          | 30             | 93.5             | 0.35                   | 0.157               | 0.055                    | 0.892                  |
| Madrigal        | 30             | 190.5            | 0.421                  | 0.235               | 0.006                    | 0.811                  |
| Chivay          | 30             | 146.3            | 0.334                  | 0.149               | 0.244                    | 0.893                  |
| Pillones        | 30             | 130.9            | 0.308                  | 0.223               | 0.028                    | 0.739                  |
| El Frayle       | 29             | 117.1            | 0.421                  | 0.381               | 0.045                    | 0.434                  |
| Chiguata        | 30             | 108.4            | 0.563                  | 0.331               | 0.652                    | 0.874                  |

*FUENTE: Elaboración propia. Software: Hydraccess.*

Este análisis indica que:

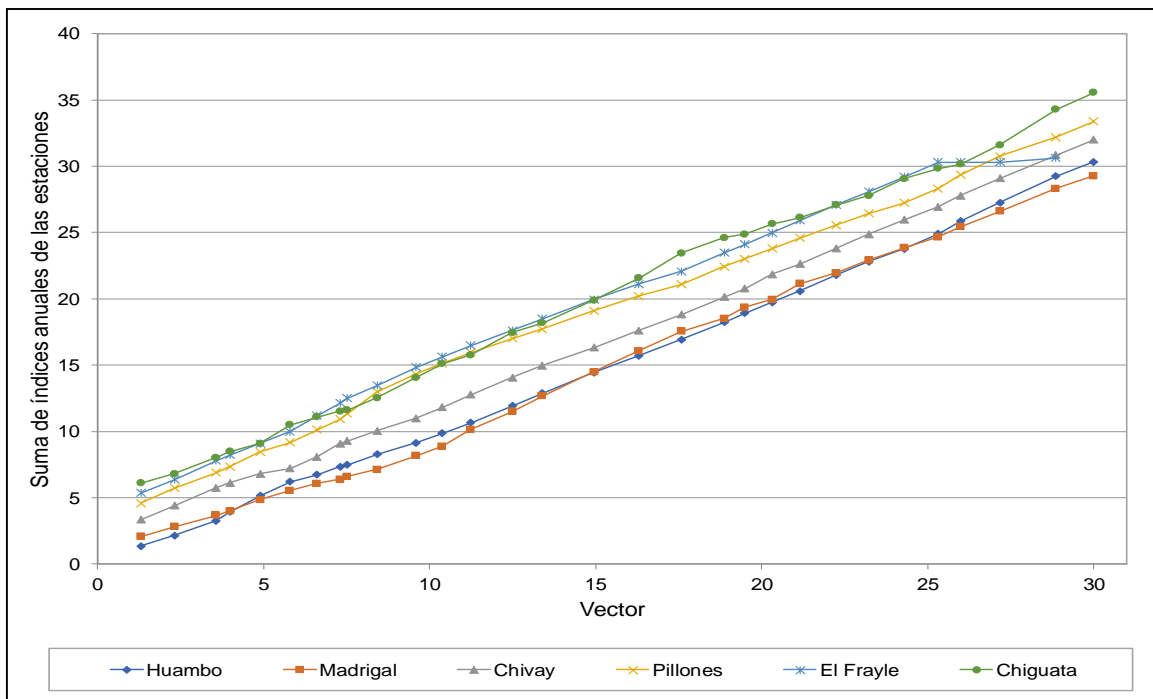
Los principales parámetros de crítica de datos indican que la estación con la mejor correlación es la estación Huambo, con menores valores de desvíos observados y con una correlación de 0.892, mayor a los demás valores de las demás estaciones. Además, esto puede ser verificado de manera gráfica en la **Figura 3** y **Figura 4**, donde la homogeneidad y la tendencia de todas las estaciones con respecto al vector regional son casi similares.

En general, y teniendo en cuenta el análisis explicado anteriormente, se puede decir que la correlación de las estaciones con respecto al Vector, son calificadas de aceptable a muy buena, por lo tanto, se encontrarían dentro de una zona homogénea.



FUENTE: Elaboración propia

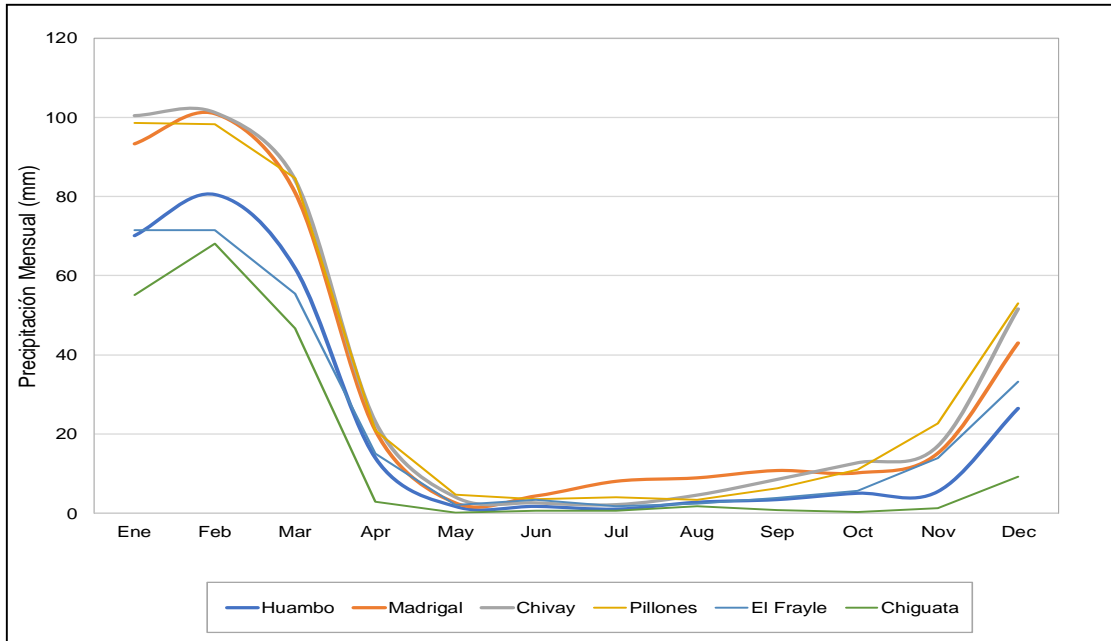
**Figura 3** Análisis de Confianza – Índices Anuales



FUENTE: Elaboración propia

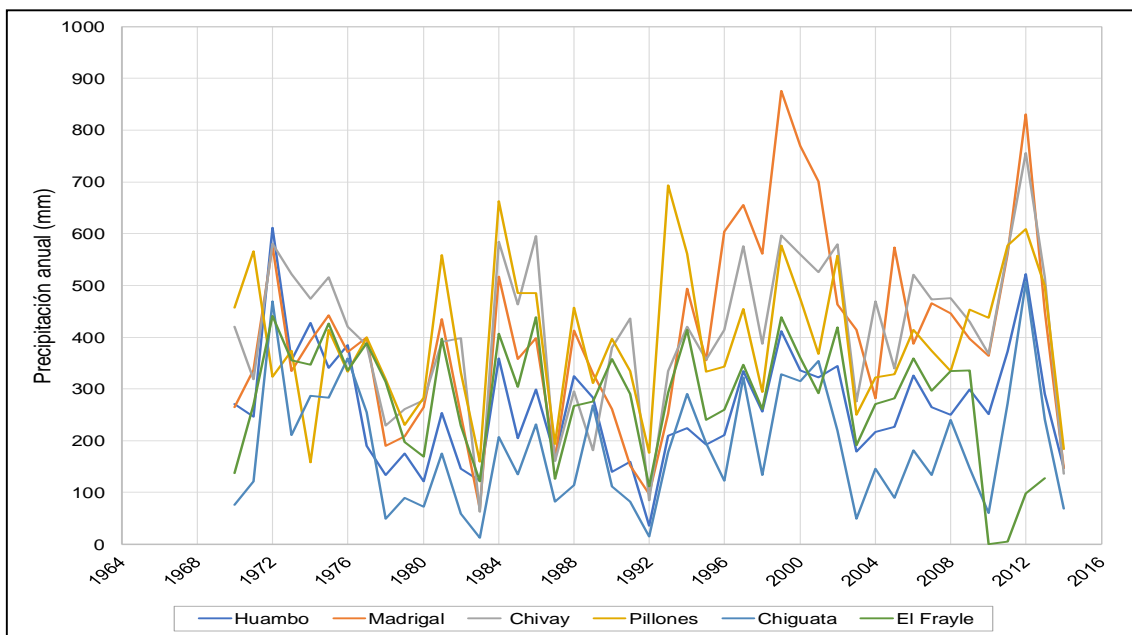
**Figura 4** Análisis de Confianza – Suma de Índices Anuales

La distribución de la precipitación de estas 6 estaciones se muestra en las siguientes figuras:



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 5** Precipitación Mensual en las Estaciones Regionales del SENAMHI Cercanas al Área de Estudio



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 6** Precipitación Anual en las Estaciones Regionales del SENAMHI Cercanas al Área de Estudio

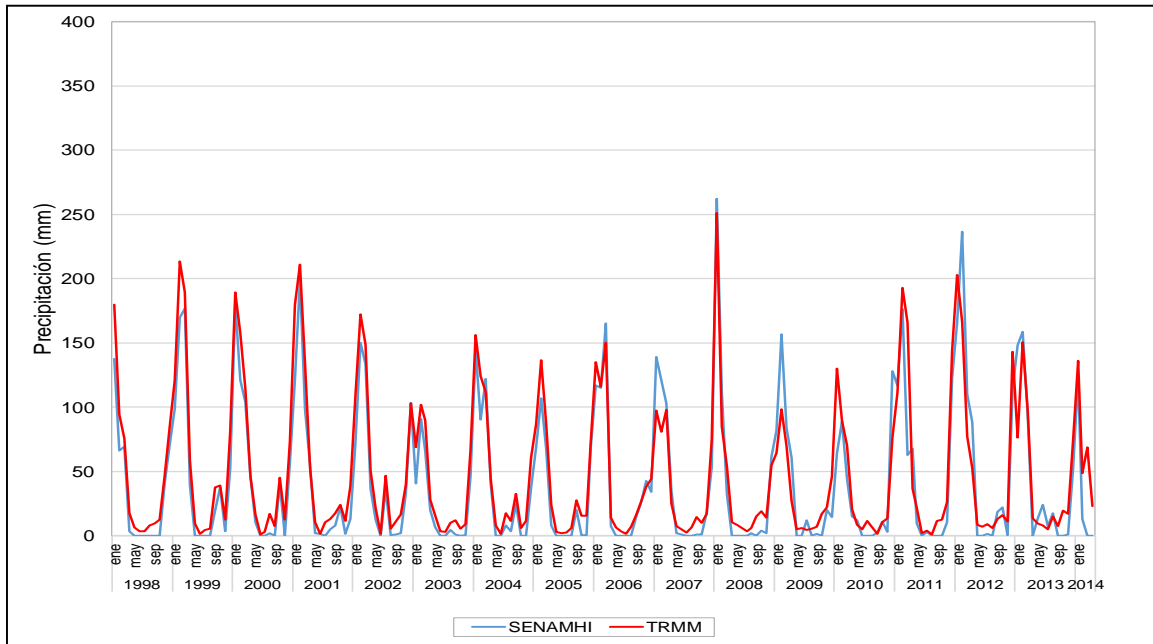
### 2.2.2 VALIDACIÓN DE PRECIPITACIÓN SATELITAL TRMM

Como parte del balance hídrico se cuenta con un registro diario de precipitación TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), Misión de medición de lluvias tropicales realizado por la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA) diseñada para monitorear y estudiar precipitaciones tropicales y subtropicales. Este satélite nos suministra información de precipitación diaria y cada 25 km \* 25 km, por el período del 1 de enero del 1998 al 31 de marzo del 2016. A través del reescalamiento espacial de la precipitación satelital TRMM de 25 km \* 25 km. por métodos estadístico y respuesta vegetativa se obtiene la precipitación a 1 km<sup>2</sup> de resolución espacial.

Ahora es necesario validar la precipitación a 1 km<sup>2</sup> de resolución espacial derivada del TRMM con las estaciones del SENAMHI disponibles en las cuencas de estudio y que tengan registros, al menos mensuales de precipitación, en el periodo de tiempo de 1998 al 2016 para poder comparar ambas series de tiempo.

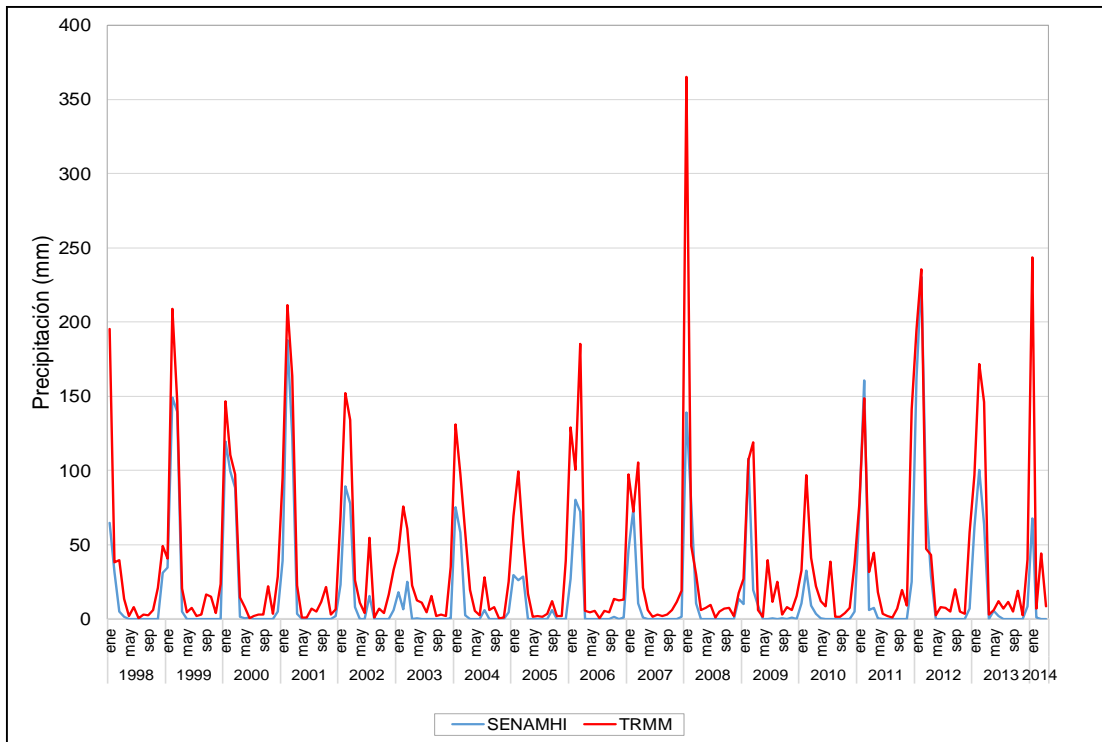
Para ello, se generaron 6 estaciones en las mismas localizaciones de las estaciones Huambo, Madrigal, Chivay, Pillones, El Frayle y Chiguata, con los siguientes nombres de estaciones: estación TRMM Huambo, TRMM Madrigal, TRMM Chivay, TRMM Pillones, TRMM El Frayle y TRMM Chiguata.

Desde la **Figura 7** hasta la **Figura 12** se muestra el contraste de las precipitaciones promedio mensuales de las 6 estaciones de SENAMHI y de las TRMM correspondientes al período 1998-2014.



FUENTE: Elaboración propia

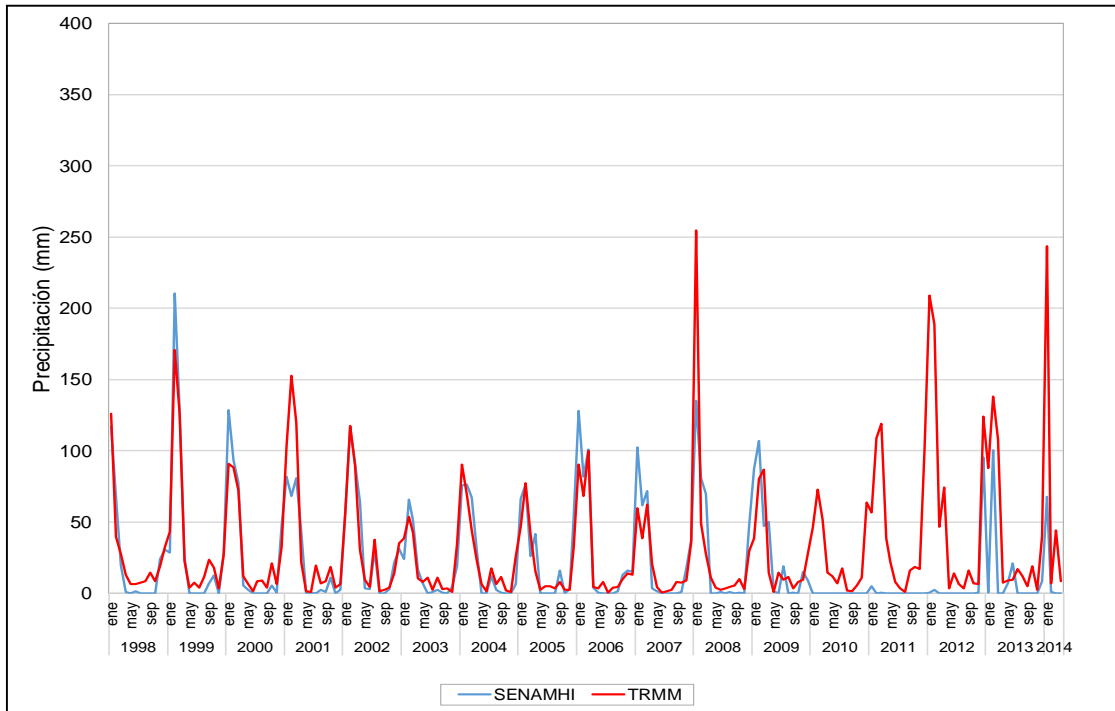
**Figura 7** Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM Chivay, Periodo (1998-2014)



FUENTE: Elaboración propia

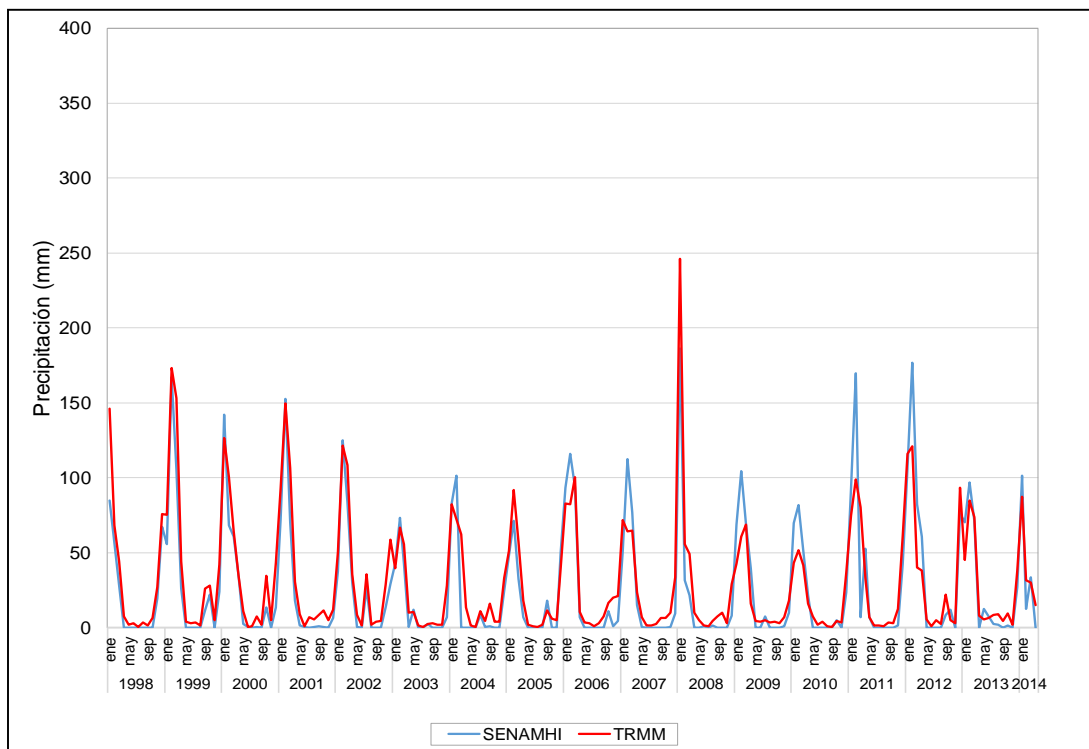
**Figura 8** Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM Chiguata, Periodo (1998-2014)





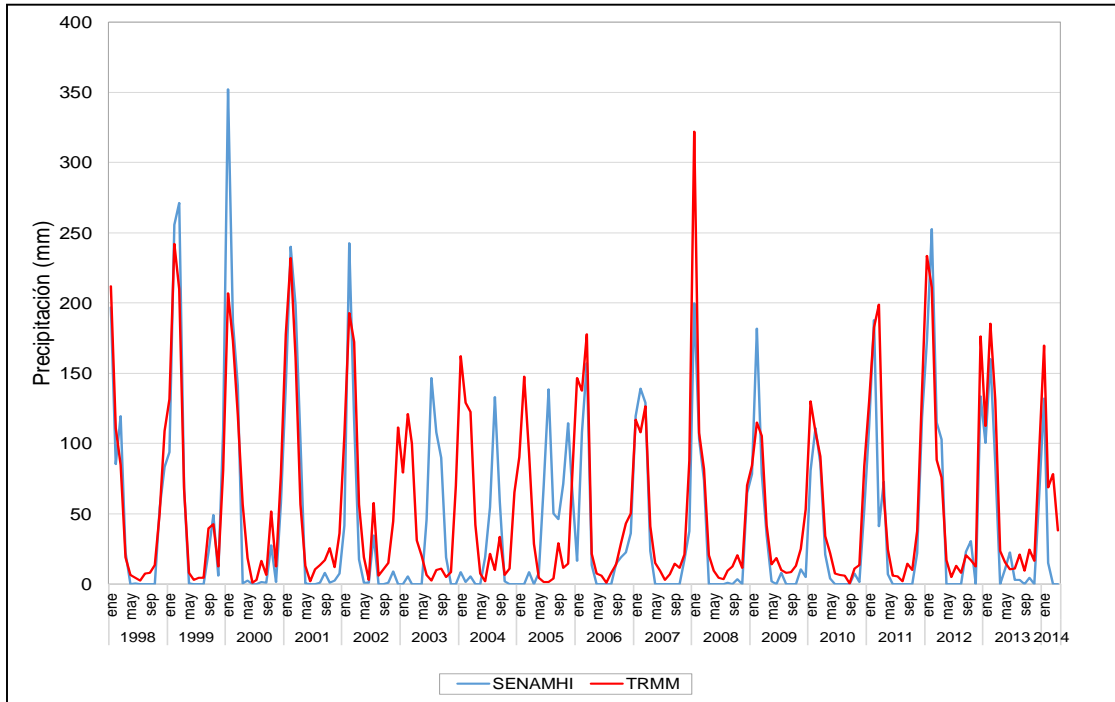
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 9** Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM El Frayle, Periodo (1998-2014)



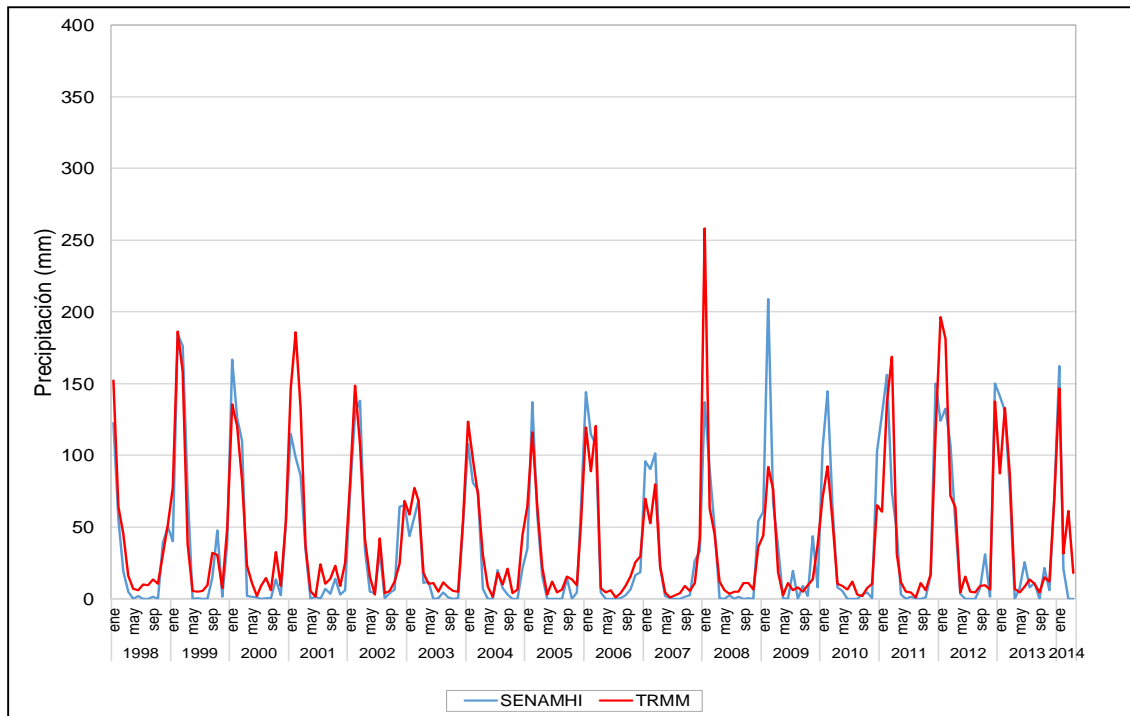
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 10** Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM Huambo, Periodo (1998-2014)



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 11 Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM Madrigal, Periodo (1998-2014)**



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 12 Precipitación Promedio Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM Pillones, Periodo (1998-2014)**

Las series de precipitaciones derivadas del satélite y las del SENAMHI se comparan por medio de una batería de análisis estadísticos que se muestran a continuación. Al realizar los cálculos, se obtienen los índices estadísticos mostrados en la **Tabla 4** para los datos mensuales.

Los análisis estadísticos muestran que ambas series de tiempo para todas las estaciones son similares y equivalentes. A continuación, un resumen de los principales indicadores los cuales varían de un rango mínimo de satisfactorio a muy bueno. Solo la estación Chiguata no llega a un mínimo de validez para ser utilizada. Es importante recordar que la estación Chiguata se encuentra en la parte baja de la cuenca donde llueve aproximadamente 300 mm/año, es decir, una zona que no genera caudales importantes. La estación Chiguata se encuentra ubicada entre las estaciones virtuales EV54, EV55 y EV57 (ver **Figura 17**).

**Tabla 4** Resumen de los Indicadores Estadísticos más Importantes para la Comparación de las Series de Tiempo Completas (época seca y húmeda)

| <i>Índices</i> | <i>Chivay</i>     | <i>Chiguata</i>   | <i>El Frayle</i> | <i>Huambo</i>     | <i>Madrigal</i>      | <i>Pillones</i>   |
|----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| R              | 0.94              | 0.86              | 0.88             | 0.91              | 0.9                  | 0.89              |
| R <sup>2</sup> | 0.88              | 0.75              | 0.78             | 0.83              | 0.81                 | 0.79              |
| D              | 0.96              | 0.86              | 0.94             | 0.95              | 0.94                 | 0.94              |
| NSE            | 0.86              | 0.15              | 0.77             | 0.81              | 0.77                 | 0.78              |
| RSR            | 0.38              | 0.92              | 0.48             | 0.43              | 0.47                 | 0.47              |
| PBIAS          | 18.3              | 109.1             | 4.5              | 17                | 25.9                 | 8.8               |
| Validez        | Bueno             | No aceptable      | Bueno            | Bueno             | Satisfactorio *      | Muy Bueno         |
| Periodo anual  | 1998 - abril 2014 | 1998 - abril 2014 | 1998-2009        | 1998 - abril 2014 | 1998-2002, 2006-2014 | 1998 - abril 2014 |

*FUENTE: Elaboración propia*

### **2.2.3 VALIDACIÓN EN MESES HÚMEDOS**

Ya que la época de lluvias en la zona es muy marcada, de enero a marzo, es importante centrar el análisis de las precipitaciones en esta época del año para asegurarnos que las precipitaciones derivadas del satélite son capaces de representar las precipitaciones observadas por las estaciones meteorológicas del SENAMHI.

Al realizar los cálculos de validación de datos mensuales de precipitación desde 1998 hasta 2014 de las estaciones meteorológicas de SENAMHI y estaciones TRMM para meses húmedos, se obtuvieron los índices estadísticos mostrados en la **Tabla 5**.

**Tabla 5** Resumen de los Indicadores Estadísticos más Importantes para la Comparación de las Series de Tiempo Completas (época húmeda)

| <i>Índices</i> | <i>Chivay</i> | <i>Chiguata</i> | <i>El Frayle</i> | <i>Huambo</i> | <i>Madrigal</i> | <i>Pillones</i> |
|----------------|---------------|-----------------|------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| R              | 0.93          | 0.82            | 0.67             | 0.87          | 0.77            | 0.82            |
| R <sup>2</sup> | 0.86          | 0.66            | 0.45             | 0.75          | 0.59            | 0.68            |
| D              | 0.96          | 0.81            | 0.8              | 0.93          | 0.85            | 0.9             |
| NSE            | 0.84          | -0.1            | 0.14             | 0.74          | 0.48            | 0.65            |
| RSR            | 0.4           | 1.04            | 0.92             | 0.51          | 0.72            | 0.59            |
| PBIAS          | 16.3          | 109.1           | 45.1             | 10.7          | 33.4            | 2.3             |
| Validez        | Bueno         | No aceptable    | No aceptable     | Bueno         | Satisfactorio   | Bueno           |

FUENTE: *Elaboración propia*

En base a las pruebas estadísticas en los meses húmedos vemos que los valores de validez se reducen y las estaciones Chiguata y El Frayle nuevamente se reafirma que no llegan a un mínimo de validez. Ambas estaciones comparten características similares. Ambas están en zonas donde llueve aproximadamente 300 mm/año y por ende es una zona que no genera caudales importantes.

#### 2.2.4 DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN SATELITAL TRMM

En base al análisis previo realizado, se generó 57 estaciones virtuales dentro de la zona de estudio hidrológico con la finalidad de obtener una mejor representatividad de la precipitación (**Figura 17**). En la **Tabla 6** se muestra las coordenadas de las estaciones virtuales derivadas del satélite.

**Tabla 6** Coordenadas de las Estaciones Virtuales en las Zonas de Estudio Hidrológico

| <i>Estación virtual</i> | <i>Este</i> | <i>Norte</i> | <i>Elevación</i> |
|-------------------------|-------------|--------------|------------------|
|                         | <i>(m)</i>  | <i>(m)</i>   | <i>(msnm)</i>    |
| EV1                     | 768453.3    | 8324770.9    | 4729             |
| EV2                     | 793492.3    | 8331780.6    | 4630             |
| EV3                     | 822294.2    | 8321216.1    | 4761             |
| EV4                     | 883420.4    | 8321628.7    | 4387             |
| EV5                     | 902765.7    | 8319753.7    | 4469             |
| EV6                     | 924019.6    | 8298425.2    | 4689             |
| EV7                     | 782836.7    | 8313530.2    | 3832             |
| EV8                     | 813542.1    | 8310259.4    | 4531             |
| EV9                     | 884732.0    | 8303210.4    | 4429             |

| <i>Estación virtual</i> | <i>Este</i> | <i>Norte</i> | <i>Elevación</i> |
|-------------------------|-------------|--------------|------------------|
|                         | <i>(m)</i>  | <i>(m)</i>   | <i>(msnm)</i>    |
| EV10                    | 905451.2    | 8294655.6    | 4275             |
| EV11                    | 923353.0    | 8279699.8    | 4449             |
| EV12                    | 785100.0    | 8296450.8    | 4086             |
| EV13                    | 817625.5    | 8294366.0    | 5013             |
| EV14                    | 880968.0    | 8283656.9    | 3826             |
| EV15                    | 790442.7    | 8285643.3    | 3596             |
| EV16                    | 824667.8    | 8275659.8    | 3862             |
| EV17                    | 851618.6    | 8268613.6    | 3885             |
| EV18                    | 874885.0    | 8266580.2    | 4922             |
| EV19                    | 900374.0    | 8268695.3    | 4420             |
| EV20                    | 923943.1    | 8265164.3    | 4410             |
| EV21                    | 764779.4    | 8266910.3    | 3246             |
| EV22                    | 781678.2    | 8271468.5    | 4742             |
| EV23                    | 794747.6    | 8261447.5    | 1451             |
| EV24                    | 811239.4    | 8259344.2    | 3338             |
| EV25                    | 835055.8    | 8252025.2    | 5395             |
| EV26                    | 857471.1    | 8251680.9    | 4844             |
| EV27                    | 877781.9    | 8253566.1    | 4746             |
| EV28                    | 894949.3    | 8253272.1    | 4314             |
| EV29                    | 911143.4    | 8252428.6    | 4669             |
| EV30                    | 930759.0    | 8250731.9    | 4492             |
| EV31                    | 760252.0    | 8246370.1    | 3535             |
| EV32                    | 781632.9    | 8242015.1    | 2424             |
| EV33                    | 805498.8    | 8239487.3    | 4126             |
| EV34                    | 830874.0    | 8237575.5    | 4084             |
| EV35                    | 857550.9    | 8236499.7    | 4022             |
| EV36                    | 876808.7    | 8233966.7    | 4911             |
| EV37                    | 896117.0    | 8234297.2    | 4207             |
| EV38                    | 915710.1    | 8232388.5    | 4767             |
| EV39                    | 930339.1    | 8228895.1    | 4599             |
| EV40                    | 943125.2    | 8224540.6    | 4693             |
| EV41                    | 755733.7    | 8226162.0    | 1834             |
| EV42                    | 782027.5    | 8222410.6    | 1460             |
| EV43                    | 802776.4    | 8220586.1    | 2602             |
| EV44                    | 825637.3    | 8216716.6    | 2869             |
| EV45                    | 859740.0    | 8219400.5    | 3500             |
| EV46                    | 879292.6    | 8216192.1    | 4085             |
| EV47                    | 896183.6    | 8219996.7    | 4089             |
| EV48                    | 913460.7    | 8209591.5    | 4357             |
| EV49                    | 926641.4    | 8198583.7    | 4696             |
| EV50                    | 756240.3    | 8196152.8    | 1296             |

| <i>Estación virtual</i> | <i>Este</i> | <i>Norte</i> | <i>Elevación</i> |
|-------------------------|-------------|--------------|------------------|
|                         | <i>(m)</i>  | <i>(m)</i>   | <i>(msnm)</i>    |
| EV51                    | 782201.1    | 8194281.8    | 1293             |
| EV52                    | 818844.4    | 8191450.0    | 1656             |
| EV53                    | 846131.0    | 8192029.9    | 2047             |
| EV54                    | 882631.1    | 8198733.6    | 3384             |
| EV55                    | 914501.3    | 8185401.7    | 4296             |
| EV56                    | 804395.4    | 8160423.5    | 1094             |
| EV57                    | 856482.1    | 8170920.1    | 2457             |

FUENTE: *Elaboración propia*

La **Tabla 7** detalla los valores de las precipitaciones promedias mensuales entre 1998 y el 2017 para las 57 estaciones virtuales.

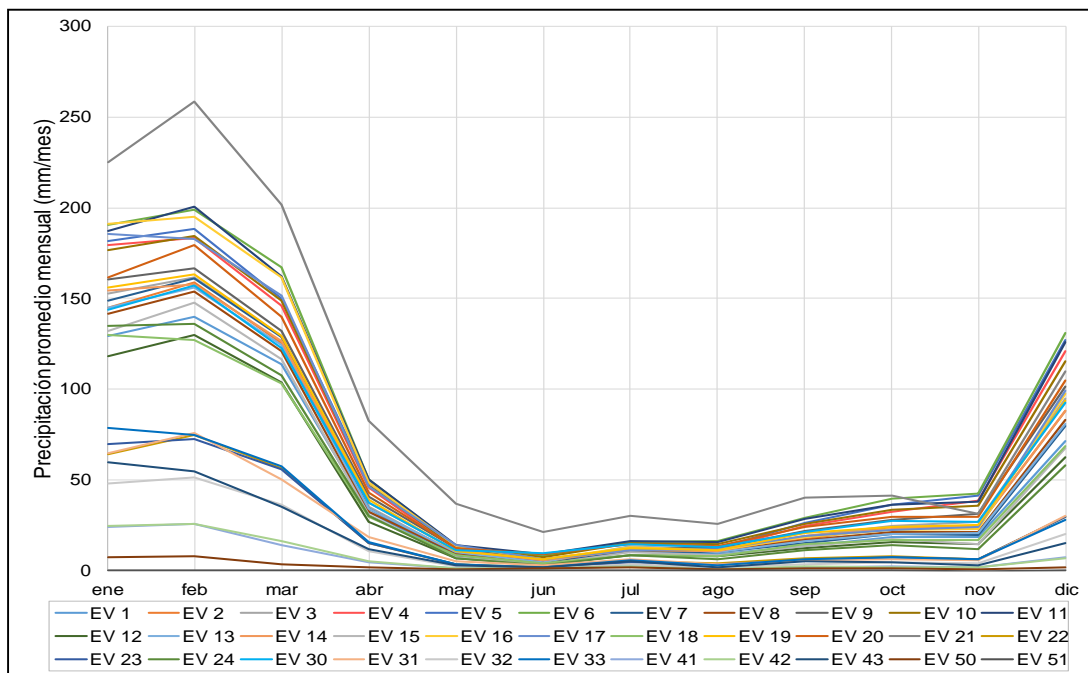
**Tabla 7 Precipitaciones (mm) Promedio Mensuales (1998-2017)**

|       | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| EV 1  | 739  | 888  | 665  | 706  | 691  | 370  | 413  | 423  | 563  | 507  | 543  | 357  | 449  | 624  | 731  | 459  | 451  | 508  | 357  | 755  |
| EV 2  | 815  | 992  | 767  | 785  | 767  | 462  | 502  | 494  | 662  | 577  | 583  | 418  | 542  | 720  | 832  | 569  | 563  | 600  | 517  | 736  |
| EV 3  | 779  | 978  | 816  | 833  | 825  | 495  | 596  | 524  | 688  | 574  | 580  | 450  | 566  | 799  | 840  | 624  | 594  | 690  | 338  | 849  |
| EV 4  | 786  | 1009 | 936  | 958  | 968  | 634  | 847  | 707  | 821  | 607  | 719  | 646  | 704  | 907  | 969  | 777  | 741  | 802  | 590  | 872  |
| EV 5  | 828  | 1031 | 964  | 1072 | 1082 | 755  | 820  | 729  | 838  | 658  | 736  | 619  | 706  | 913  | 1019 | 815  | 777  | 828  | 604  | 763  |
| EV 6  | 884  | 1071 | 993  | 1084 | 1050 | 771  | 900  | 801  | 896  | 800  | 762  | 691  | 745  | 1129 | 1113 | 885  | 831  | 802  | 512  | 1015 |
| EV 7  | 770  | 951  | 717  | 750  | 742  | 416  | 471  | 459  | 621  | 563  | 569  | 396  | 484  | 664  | 826  | 549  | 497  | 564  | 567  | 1068 |
| EV 8  | 730  | 931  | 736  | 761  | 766  | 421  | 509  | 467  | 625  | 533  | 545  | 391  | 455  | 735  | 795  | 573  | 507  | 630  | 424  | 845  |
| EV 9  | 711  | 934  | 856  | 883  | 896  | 571  | 725  | 611  | 733  | 546  | 630  | 527  | 601  | 846  | 917  | 694  | 631  | 715  | 508  | 745  |
| EV 10 | 829  | 1034 | 946  | 1024 | 1009 | 673  | 814  | 713  | 846  | 699  | 714  | 613  | 672  | 994  | 993  | 764  | 734  | 762  | 547  | 698  |
| EV 11 | 842  | 1042 | 924  | 1096 | 1054 | 755  | 838  | 758  | 849  | 767  | 779  | 700  | 720  | 1050 | 1070 | 899  | 801  | 785  | 713  | 961  |
| EV 12 | 652  | 845  | 601  | 646  | 638  | 328  | 392  | 379  | 518  | 456  | 488  | 302  | 352  | 550  | 683  | 448  | 369  | 485  | 347  | 603  |
| EV 13 | 708  | 909  | 734  | 753  | 773  | 445  | 549  | 495  | 625  | 542  | 578  | 425  | 444  | 758  | 780  | 567  | 496  | 645  | 481  | 817  |
| EV 14 | 648  | 871  | 784  | 803  | 818  | 480  | 663  | 569  | 665  | 516  | 573  | 456  | 543  | 815  | 849  | 630  | 548  | 650  | 428  | 877  |
| EV 15 | 697  | 873  | 644  | 715  | 711  | 372  | 467  | 401  | 622  | 513  | 566  | 341  | 349  | 584  | 792  | 602  | 429  | 571  | 375  | 614  |
| EV 16 | 823  | 1021 | 879  | 935  | 968  | 574  | 708  | 569  | 872  | 729  | 831  | 613  | 553  | 863  | 1082 | 888  | 670  | 813  | 480  | 948  |
| EV 17 | 748  | 974  | 882  | 897  | 930  | 575  | 710  | 587  | 791  | 683  | 765  | 648  | 609  | 986  | 1069 | 845  | 646  | 786  | 405  | 754  |
| EV 18 | 509  | 734  | 646  | 676  | 690  | 371  | 546  | 447  | 532  | 401  | 504  | 341  | 417  | 690  | 690  | 475  | 405  | 512  | 320  | 647  |
| EV 19 | 688  | 898  | 780  | 875  | 862  | 537  | 702  | 600  | 701  | 519  | 616  | 485  | 573  | 884  | 865  | 676  | 581  | 644  | 529  | 616  |
| EV 20 | 677  | 885  | 747  | 928  | 876  | 602  | 691  | 637  | 704  | 607  | 654  | 605  | 625  | 916  | 904  | 766  | 663  | 659  | 778  | 1063 |
| EV 21 | 1030 | 1143 | 967  | 1205 | 1183 | 698  | 824  | 746  | 1048 | 1004 | 1102 | 1033 | 724  | 1192 | 1452 | 1355 | 1166 | 1329 | 1789 | 761  |
| EV 22 | 407  | 552  | 318  | 386  | 366  | 178  | 217  | 207  | 309  | 204  | 295  | 135  | 138  | 250  | 341  | 204  | 142  | 312  | 174  | 281  |
| EV 23 | 600  | 768  | 619  | 655  | 669  | 359  | 453  | 394  | 599  | 453  | 608  | 384  | 337  | 539  | 681  | 544  | 399  | 553  | 307  | 523  |
| EV 24 | 314  | 501  | 424  | 421  | 458  | 208  | 321  | 272  | 338  | 278  | 477  | 266  | 250  | 518  | 613  | 409  | 252  | 429  | 193  | 352  |
| EV 25 | 385  | 531  | 349  | 386  | 382  | 177  | 227  | 220  | 304  | 215  | 314  | 148  | 130  | 245  | 337  | 210  | 143  | 293  | 135  | 290  |
| EV 26 | 406  | 614  | 555  | 550  | 579  | 309  | 451  | 355  | 434  | 331  | 490  | 287  | 307  | 563  | 617  | 412  | 303  | 425  | 259  | 491  |
| EV 27 | 516  | 730  | 651  | 694  | 702  | 398  | 568  | 460  | 543  | 405  | 555  | 356  | 415  | 670  | 724  | 507  | 426  | 522  | 370  | 607  |

|       | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| EV 28 | 566  | 776  | 676  | 767  | 751  | 438  | 600  | 522  | 594  | 431  | 575  | 399  | 458  | 730  | 793  | 571  | 488  | 563  | 446  | 557  |
| EV 29 | 573  | 778  | 657  | 779  | 729  | 480  | 600  | 539  | 587  | 441  | 561  | 434  | 477  | 744  | 791  | 567  | 489  | 541  | 486  | 688  |
| EV 30 | 356  | 431  | 319  | 418  | 389  | 136  | 228  | 187  | 292  | 191  | 277  | 167  | 137  | 285  | 428  | 353  | 203  | 299  | 216  | 103  |
| EV 31 | 568  | 768  | 649  | 856  | 777  | 534  | 592  | 587  | 612  | 549  | 592  | 565  | 593  | 817  | 860  | 695  | 627  | 617  | 609  | 856  |
| EV 32 | 287  | 386  | 265  | 316  | 301  | 121  | 170  | 150  | 213  | 117  | 192  | 78   | 70   | 167  | 268  | 156  | 71   | 160  | 113  | 105  |
| EV 33 | 357  | 497  | 392  | 417  | 404  | 213  | 271  | 256  | 312  | 261  | 369  | 166  | 129  | 246  | 350  | 243  | 181  | 317  | 106  | 202  |
| EV 34 | 352  | 512  | 448  | 451  | 474  | 249  | 343  | 302  | 371  | 313  | 527  | 285  | 261  | 508  | 664  | 492  | 290  | 476  | 227  | 319  |
| EV 35 | 432  | 615  | 575  | 585  | 609  | 328  | 458  | 368  | 464  | 363  | 536  | 339  | 334  | 578  | 675  | 498  | 345  | 463  | 240  | 440  |
| EV 36 | 333  | 525  | 463  | 497  | 498  | 250  | 381  | 302  | 368  | 237  | 428  | 237  | 246  | 466  | 557  | 353  | 268  | 377  | 237  | 468  |
| EV 37 | 146  | 188  | 135  | 165  | 142  | 22   | 88   | 60   | 103  | 42   | 112  | 20   | 22   | 73   | 111  | 75   | 23   | 87   | 60   | 29   |
| EV 38 | 393  | 577  | 464  | 637  | 558  | 342  | 410  | 401  | 437  | 347  | 427  | 375  | 407  | 578  | 710  | 493  | 415  | 470  | 535  | 821  |
| EV 39 | 414  | 612  | 521  | 612  | 580  | 330  | 454  | 384  | 444  | 297  | 485  | 307  | 324  | 558  | 680  | 441  | 365  | 461  | 376  | 496  |
| EV 40 | 405  | 595  | 482  | 616  | 539  | 336  | 430  | 390  | 431  | 301  | 438  | 326  | 356  | 570  | 689  | 432  | 364  | 436  | 465  | 676  |
| EV 41 | 471  | 657  | 540  | 751  | 678  | 434  | 493  | 490  | 538  | 475  | 500  | 487  | 539  | 676  | 807  | 621  | 532  | 575  | 662  | 878  |
| EV 42 | 138  | 207  | 146  | 163  | 141  | 31   | 93   | 65   | 85   | 43   | 106  | 24   | 18   | 74   | 148  | 81   | 32   | 103  | 44   | 27   |
| EV 43 | 224  | 310  | 254  | 277  | 247  | 90   | 158  | 105  | 174  | 101  | 310  | 125  | 70   | 206  | 376  | 290  | 140  | 231  | 139  | 118  |
| EV 44 | 161  | 271  | 214  | 235  | 223  | 76   | 138  | 97   | 134  | 89   | 225  | 82   | 75   | 179  | 308  | 206  | 96   | 208  | 52   | 133  |
| EV 45 | 218  | 374  | 340  | 340  | 347  | 151  | 249  | 183  | 256  | 155  | 358  | 184  | 153  | 393  | 435  | 300  | 163  | 303  | 147  | 336  |
| EV 46 | 226  | 392  | 333  | 364  | 344  | 157  | 250  | 197  | 250  | 156  | 320  | 203  | 178  | 363  | 461  | 285  | 201  | 349  | 214  | 450  |
| EV 47 | 307  | 483  | 394  | 474  | 431  | 224  | 321  | 263  | 323  | 209  | 374  | 250  | 248  | 436  | 579  | 354  | 278  | 411  | 317  | 492  |
| EV 48 | 305  | 460  | 343  | 464  | 394  | 204  | 290  | 240  | 312  | 226  | 387  | 281  | 282  | 468  | 666  | 428  | 322  | 487  | 448  | 740  |
| EV 49 | 339  | 483  | 381  | 523  | 473  | 286  | 349  | 317  | 383  | 335  | 451  | 368  | 381  | 591  | 744  | 564  | 460  | 638  | 609  | 636  |
| EV 50 | 39   | 65   | 53   | 50   | 40   | 2    | 36   | 13   | 19   | 11   | 52   | 12   | 0    | 31   | 38   | 34   | 2    | 37   | 38   | 6    |
| EV 51 | 0    | 9    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| EV 52 | 0    | 7    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 17   | 0    | 0    | 0    | 0    | 11   |
| EV 53 | 89   | 182  | 135  | 146  | 148  | 37   | 95   | 58   | 76   | 31   | 129  | 45   | 48   | 114  | 190  | 107  | 43   | 137  | 44   | 106  |
| EV 54 | 233  | 370  | 314  | 362  | 332  | 154  | 239  | 191  | 270  | 167  | 342  | 241  | 188  | 346  | 483  | 345  | 213  | 368  | 249  | 667  |
| EV 55 | 179  | 298  | 191  | 299  | 261  | 114  | 174  | 159  | 220  | 274  | 451  | 366  | 391  | 741  | 875  | 772  | 646  | 984  | 899  | 435  |
| EV 56 | 8    | 35   | 24   | 21   | 27   | 0    | 1    | 0    | 0    | 19   | 24   | 18   | 0    | 22   | 20   | 21   | 0    | 17   | 18   | 0    |
| EV 57 | 53   | 121  | 80   | 122  | 102  | 8    | 53   | 30   | 55   | 7    | 89   | 21   | 22   | 76   | 153  | 82   | 25   | 109  | 34   | 99   |

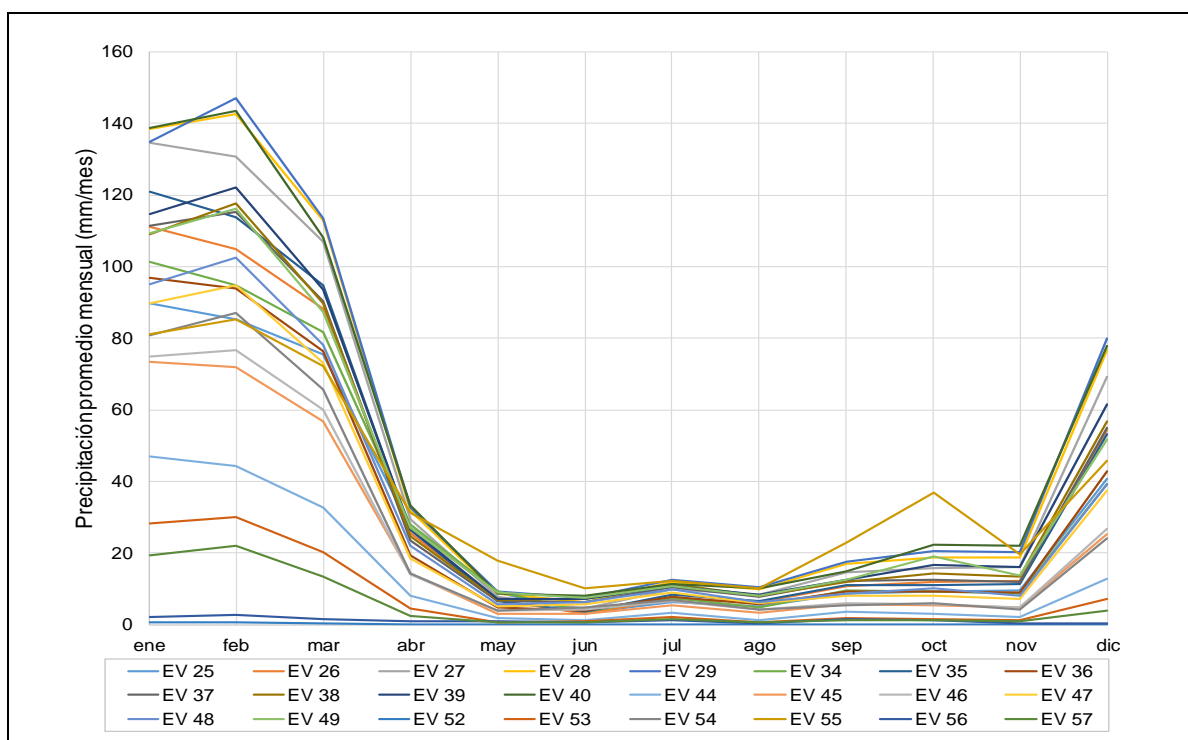
FUENTE: Elaboración propia (HydroTerra) precipitación derivada del TRMM, Resolución: 1 km<sup>2</sup>

La **Figura 13** muestra la tendencia mensual de las precipitaciones en las estaciones virtuales localizadas en la cuenca Camaná en la margen derecha del área de estudio hidrológico. y la **Figura 14** la tendencia mensual de las precipitaciones en las estaciones virtuales localizadas en la cuenca Quilca-Vitor-Chili, en la margen izquierda de la zona de estudio.



FUENTE: Elaboración propia (HydroTerra) precipitación derivada del TRMM, Resolución: 1 km<sup>2</sup>

**Figura 13** Precipitación (mm) Promedio Mensual (enero 1998 – marzo 2017) en la Cuenca Camaná-Majes-Colca

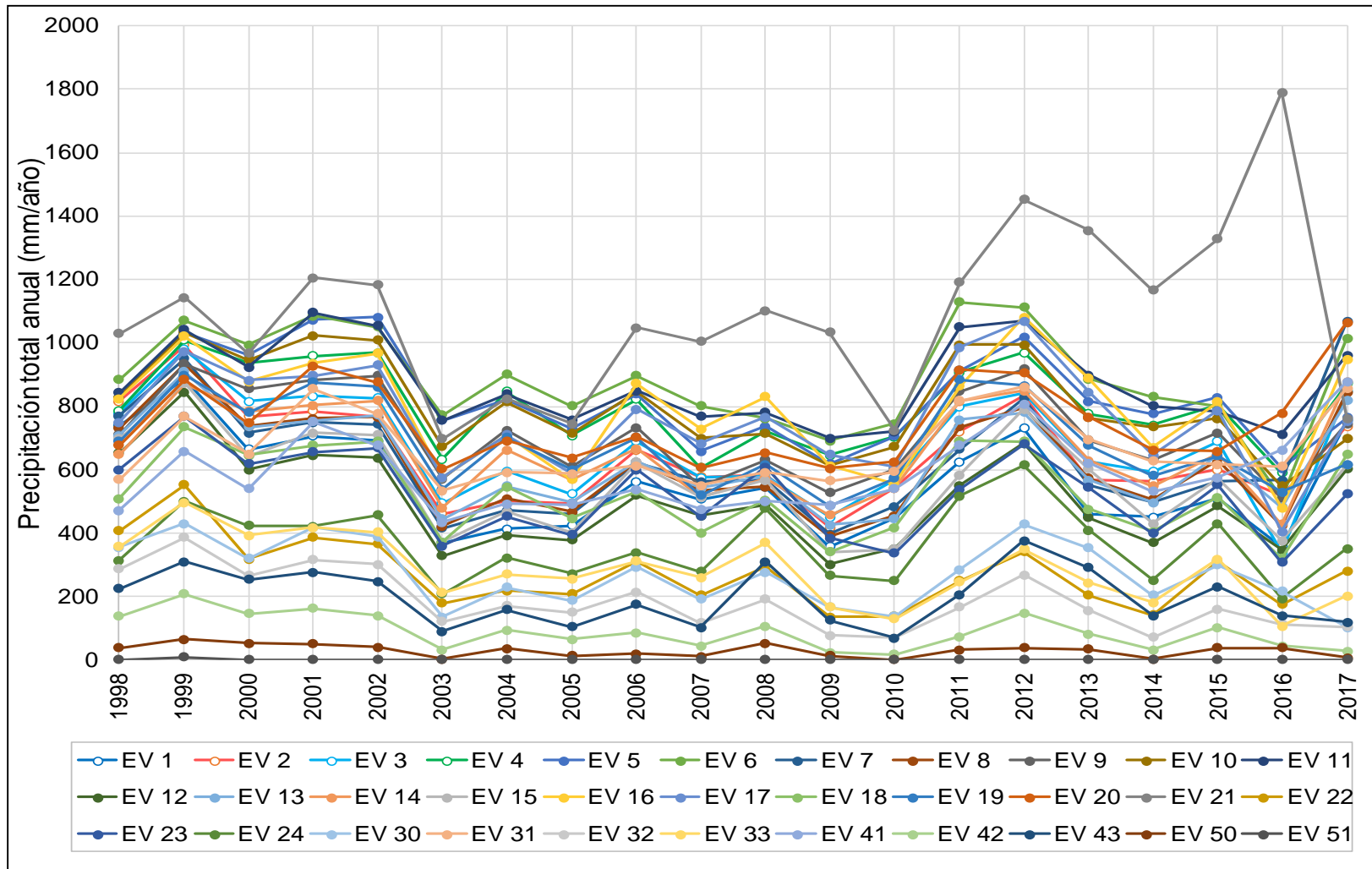


FUENTE: Elaboración propia (HydroTerra) precipitación derivada del TRMM, Resolución: 1 km<sup>2</sup>

**Figura 14** Precipitación (mm) Promedio Mensual (enero 1998 – marzo 2017) en la Cuenca Quilca – Vitor Chili

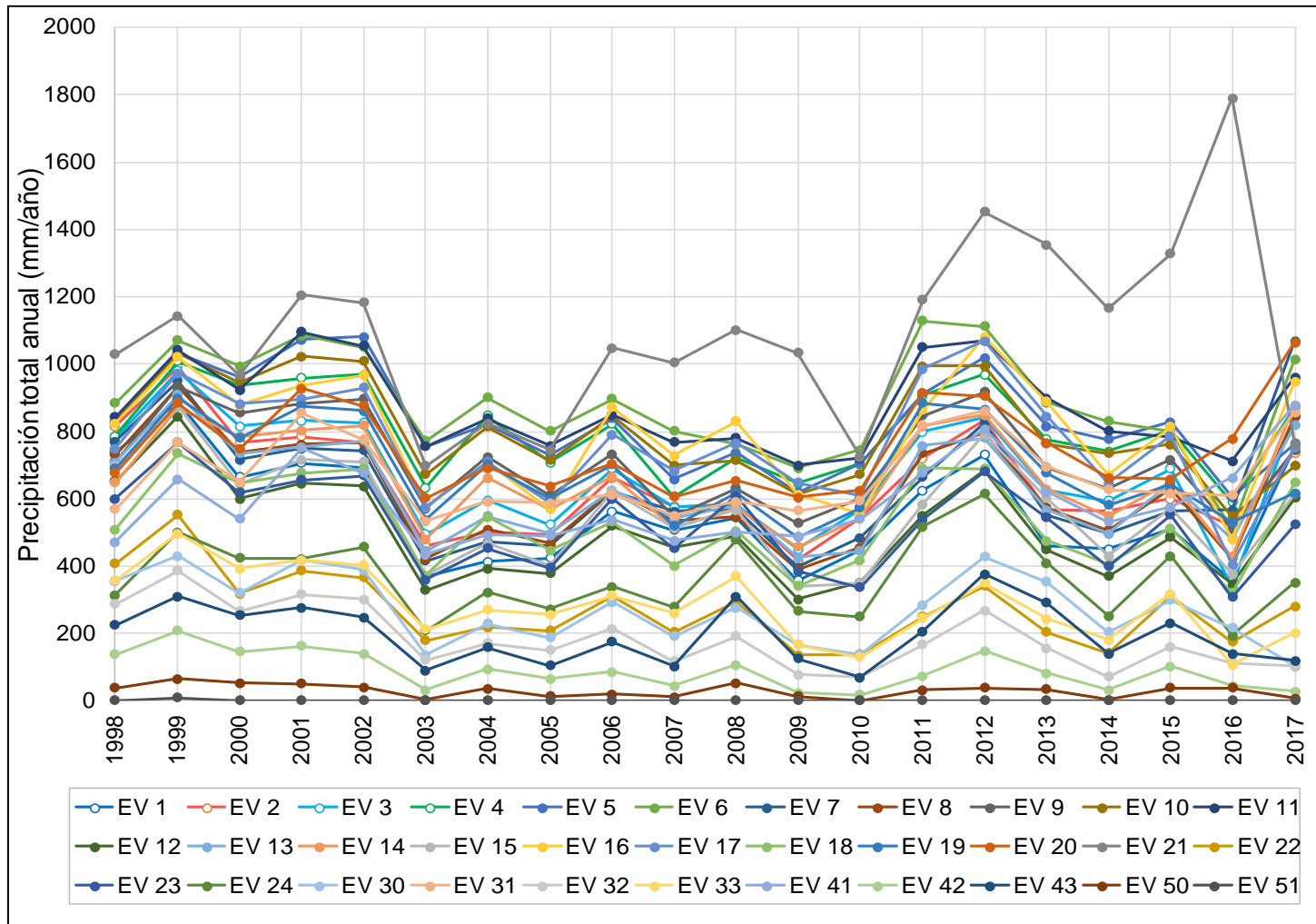


La **Figura 15** muestra la tendencia anual de las precipitaciones en las estaciones virtuales localizadas en la cuenca Camaná en la margen derecha del área de estudio hidrológico. y la   
¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., la tendencia anual de las precipitaciones e  
n las estaciones virtuales localizadas en la cuenca Quilca-Vitor-Chili, en la margen izquierda  
de la zona de estudio.



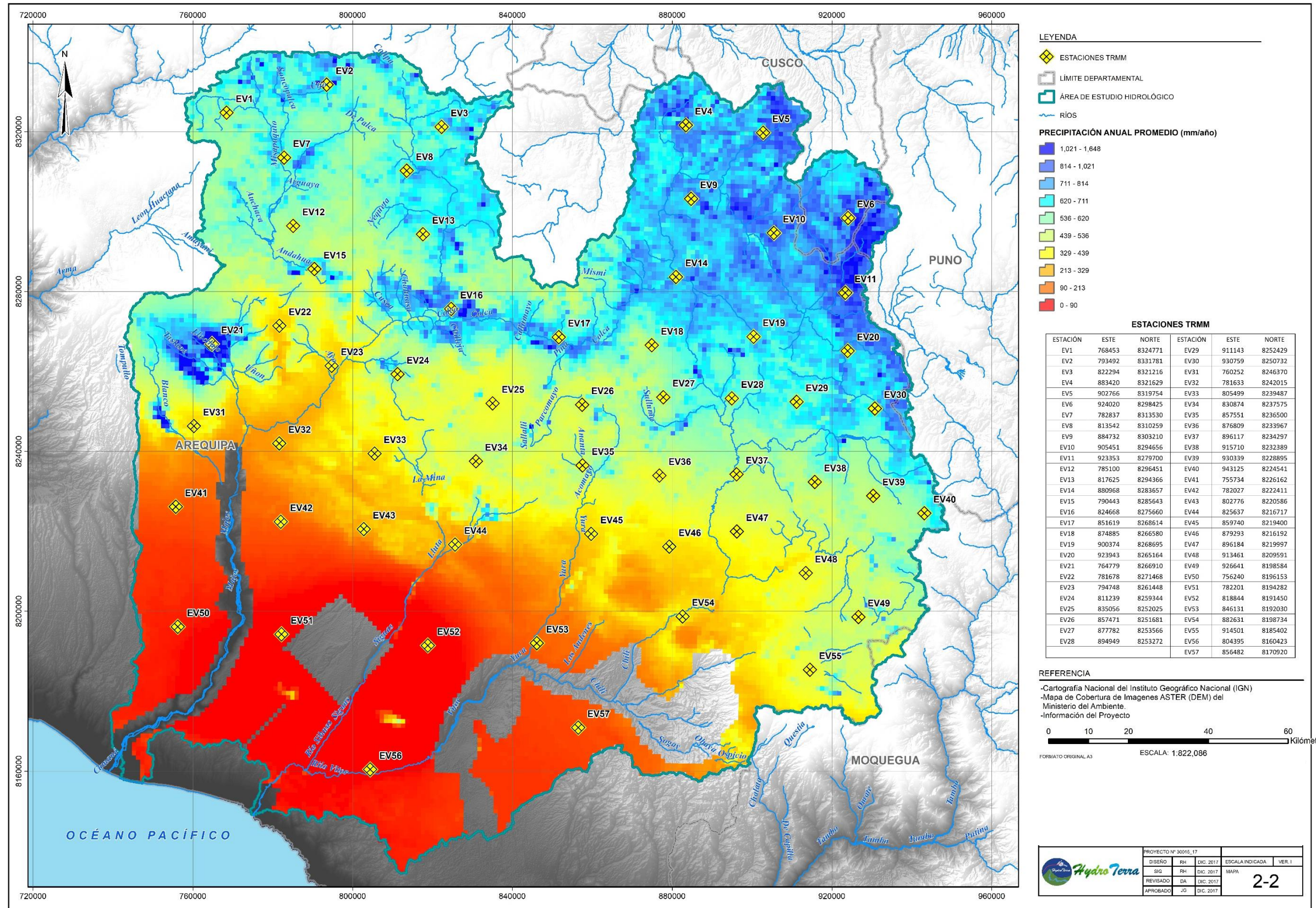
FUENTE: Elaboración propia (HydroTerra) precipitación derivada del TRMM, Resolución: 1 km<sup>2</sup>

**Figura 15** Precipitación Anual (mm/año) de las Estaciones Virtuales (1998-2017) de la cuenca Camaná-Majes-Colca



FUENTE: Elaboración propia (HydroTerra) precipitación derivada del TRMM, Resolución: 1 km

**Figura 16** Precipitación Anual (mm/año) de las Estaciones Virtuales (1998-2017) de la cuenca Quilca-Vitor-Chili



FUENTE: Elaboración propia

Figura 17 Distribución de la precipitación y ubicación de estaciones TRMM

## 2.3 METEOROLOGÍA

Debido a la falta de datos locales meteorológicos, se ha recurrido a la base de datos climáticos que la NASA mantiene a nivel global desde el 01 de enero de 1983, obteniéndose los promedios mensuales que se presentan a continuación. La ubicación de las estaciones climáticas se detalla en la *Figura 18*. y la ubicación espacial se muestra en la **Figura 18**.

**Tabla 8** Ubicación de las Estaciones Climáticas de la NASA utilizadas

| <i>Estación virtual</i> | <i>Este</i> | <i>Norte</i> | <i>Elevación</i> |
|-------------------------|-------------|--------------|------------------|
|                         | <i>(m)</i>  | <i>(m)</i>   | <i>(msnm)</i>    |
| CLIM 1                  | 902930      | 8310551      | 4497             |
| CLIM 2                  | 901960      | 8255144      | 4525             |
| CLIM 3                  | 900959      | 8199735      | 4019             |
| CLIM 4                  | 899927      | 8144325      | 2174             |
| CLIM 5                  | 848312      | 8256034      | 4308             |
| CLIM 6                  | 847445      | 8200651      | 2554             |
| CLIM 7                  | 846552      | 8145266      | 1380             |
| CLIM 8                  | 795398      | 8312157      | 4768             |
| CLIM 9                  | 794687      | 8256797      | 2298             |
| CLIM 10                 | 793954      | 8201436      | 1486             |
| CLIM 11                 | 793199      | 8146072      | 836              |

*Fuente: Elaboración propia*

Para una mejor caracterización del área de estudio hidrológico, la meteorología fue analizada en dos zonas, una zona alta y otra baja debido a las características predominantes en cada una de ellas.

### 2.3.1 RADIACIÓN SOLAR Y TEMPERATURA

La **Figura 19** muestra la radiación promedio mensual y sus desviaciones estándar en la parte alta de la zona de estudio. La radiación alcanza valores promedio anuales de 22 kWh/m<sup>2</sup>/día. Un promedio de 26 kWh/m<sup>2</sup>/día en noviembre y de 18.5 kWh/m<sup>2</sup>/día en junio. La variabilidad de la radiación es mayor entre los meses de julio a noviembre, de aproximadamente 5 kWh/m<sup>2</sup>/día. Las variaciones son menores durante los meses de diciembre a marzo, aproximadamente de 2 kWh/m<sup>2</sup>/día.

Por otro lado, la **Figura 20** muestra la radiación promedio mensual y sus desviaciones estándar en la parte baja de la zona de estudio. La radiación alcanza valores promedio

anuales de 20 kWh/m<sup>2</sup>/día. Un promedio de 26 kWh/m<sup>2</sup>/día en noviembre y de 16 kWh/m<sup>2</sup>/día en junio. La variabilidad en esta zona es mayor que en la zona alta, siendo el sesgo más alto entre los meses de junio a diciembre (10 kWh/m<sup>2</sup>/día).

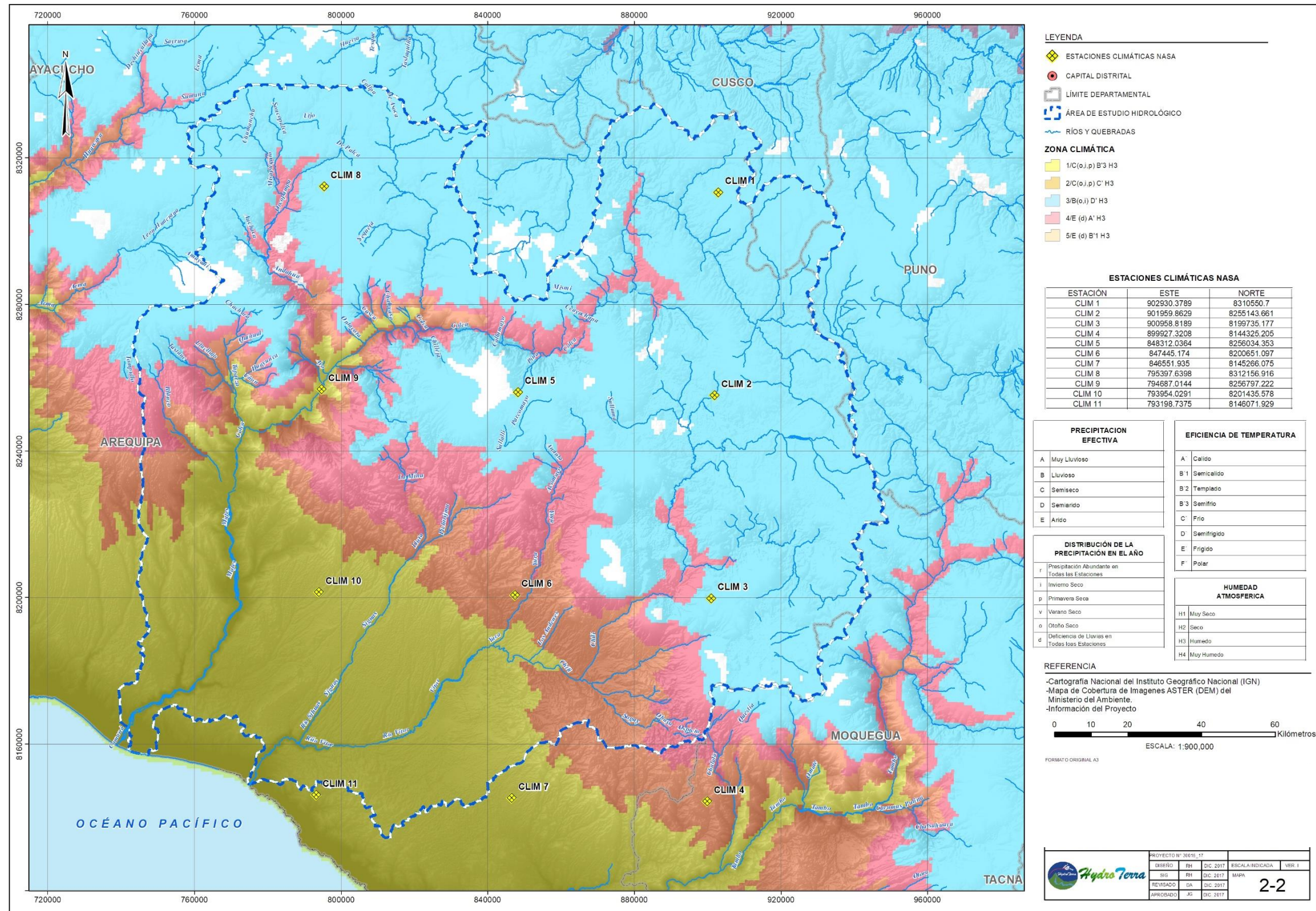
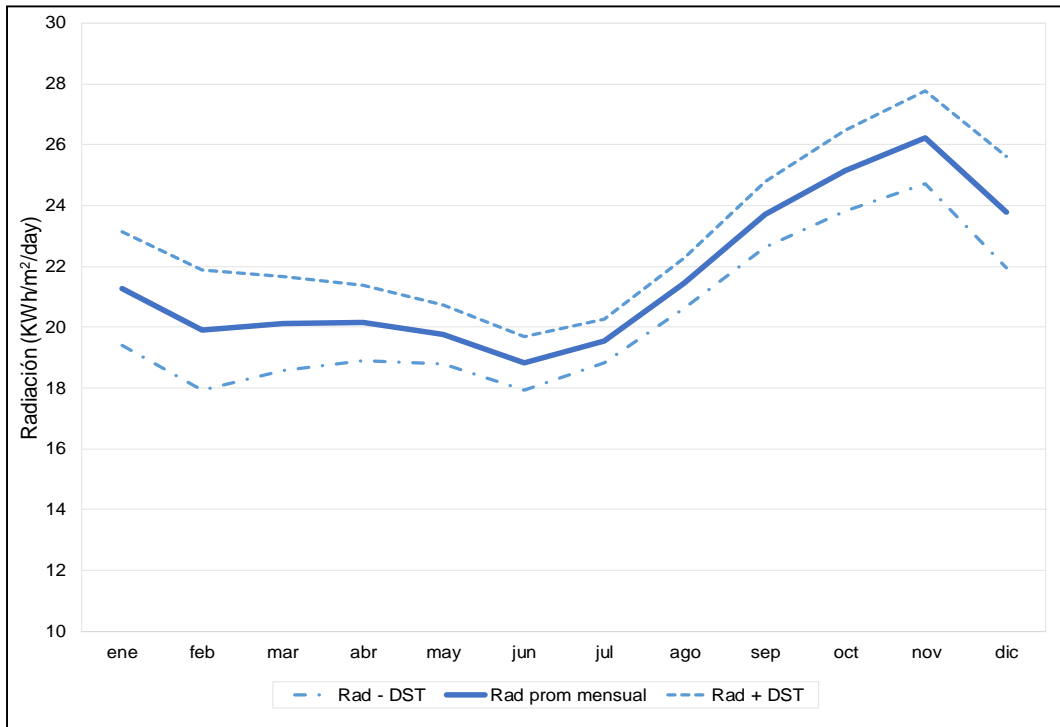
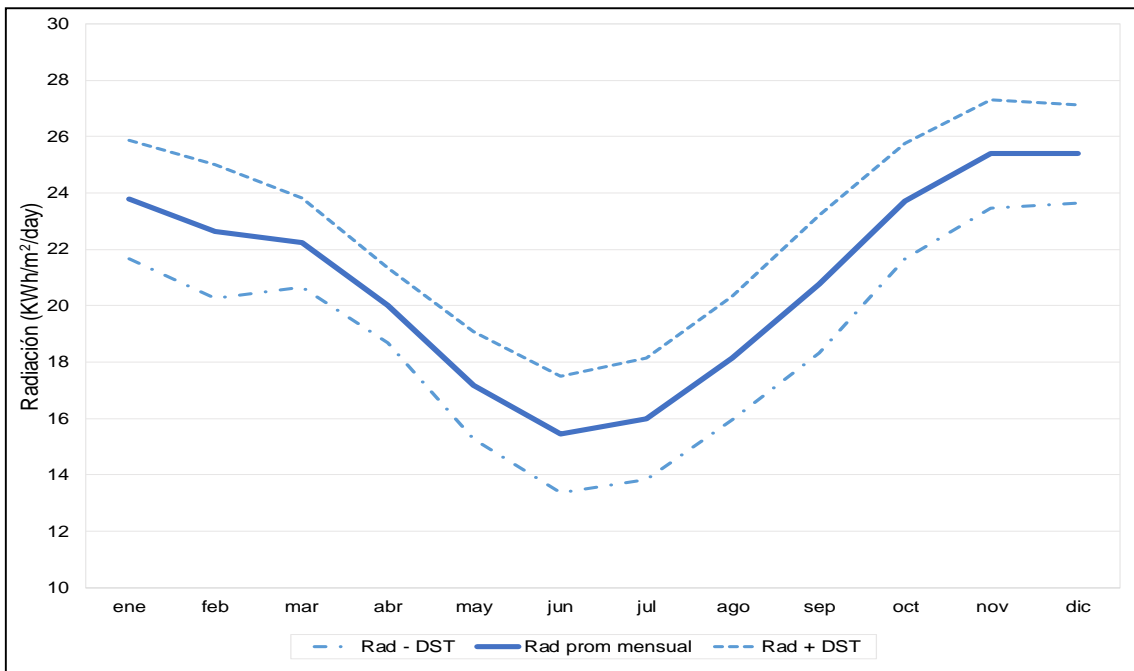


Figura 18 Ubicación de Estaciones Meteorológicas NASA



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 19 Radiación Promedio Mensual en la parte Alta de la Zona de Estudio Hidrológico**

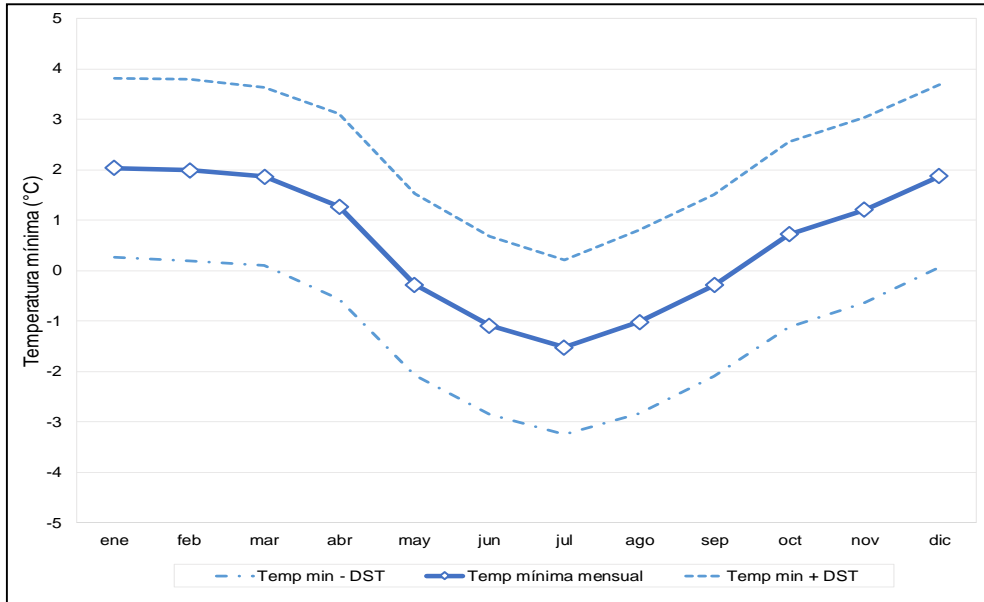


FUENTE: Elaboración propia

**Figura 20 Radiación Promedio Mensual en la parte Baja de la Zona de Estudio Hidrológico**

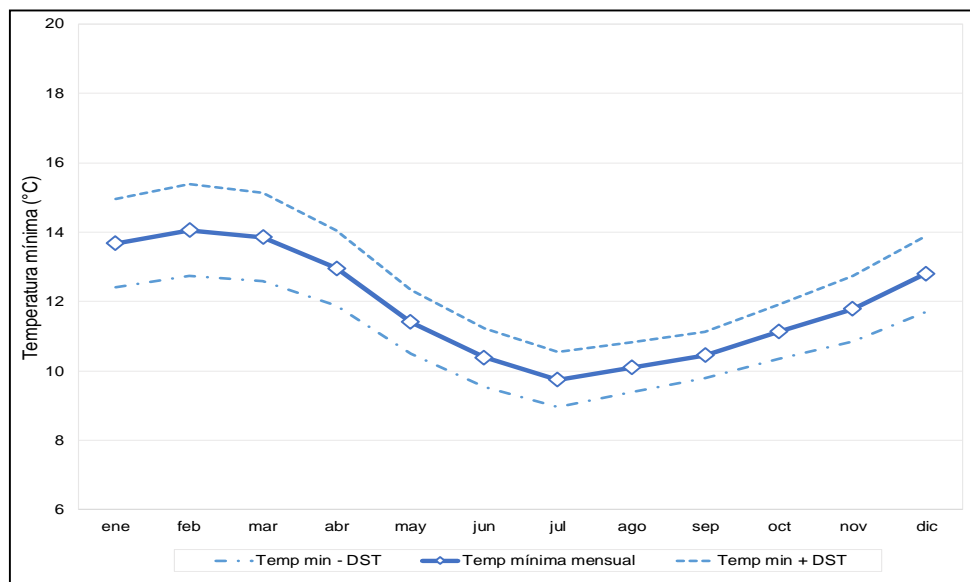


En las ;Error! No se encuentra el origen de la referencia.y **Figura 22** indican que mientras en la zona alta, la temperatura mínima promedio anual es de 1 °C, en la parte alta se eleva considerablemente hasta los 12°C. Esto muestra la tendencia al incremento en la temperatura al llegar a pisos altitudinales más cercanos al litoral.



FUENTE: Elaboración propia

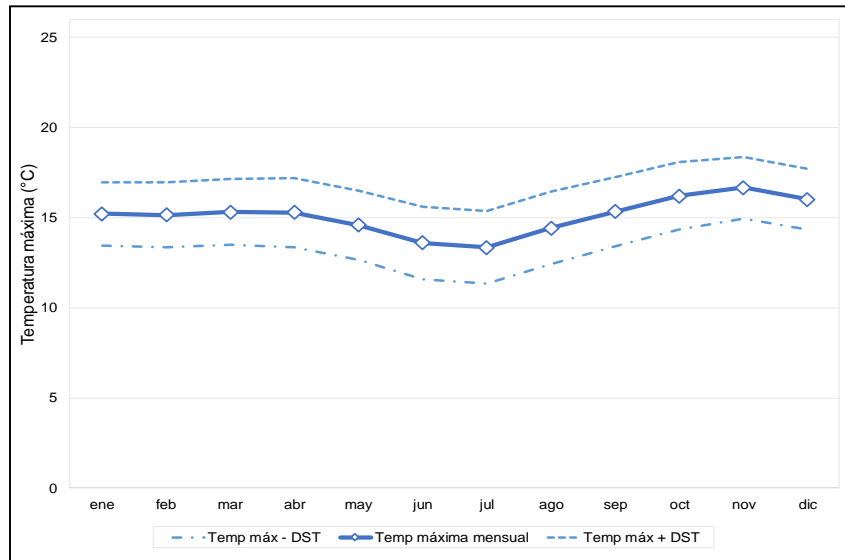
**Figura 21** Temperatura Mínima Promedio Mensual en la parte Alta de la Zona de Estudio Hidrológico



FUENTE: Elaboración propia

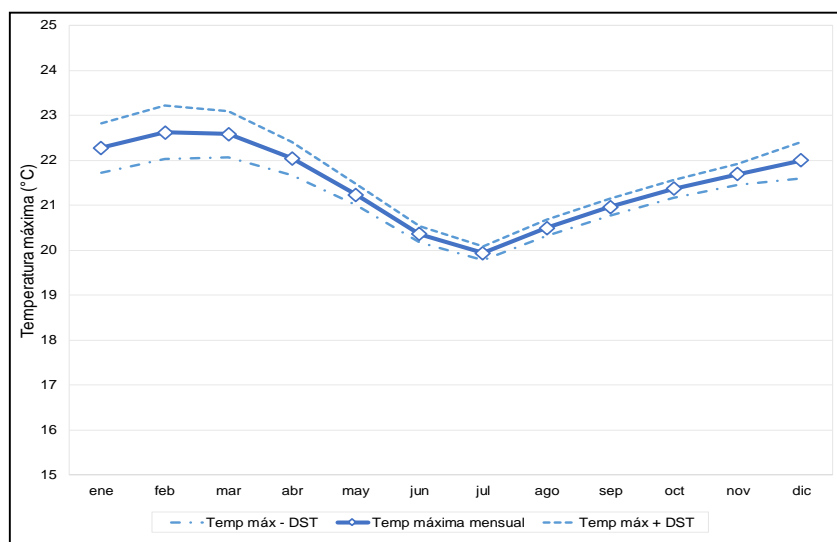
**Figura 22** Temperatura Mínima Promedio Mensual en la parte Baja de la Zona de Estudio Hidrológico

Las tendencias de temperaturas máximas se muestran en la ~~Figura 23~~ y **Figura 24**, en ellas se nota que la ~~temperatura~~ que en el caso de las temperaturas mínimas, la máxima precipitación presentada en la zona alta fue de 15.3 °C, siendo su promedio anual 14.5°C, mientras que en la zona baja podemos encontrar valores que bordean los 21 °C y que en época de verano llegan a los 22.5 °C.



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 23** Temperatura Máxima Promedio Mensual en la parte Alta de la Zona de Estudio Hidrológico

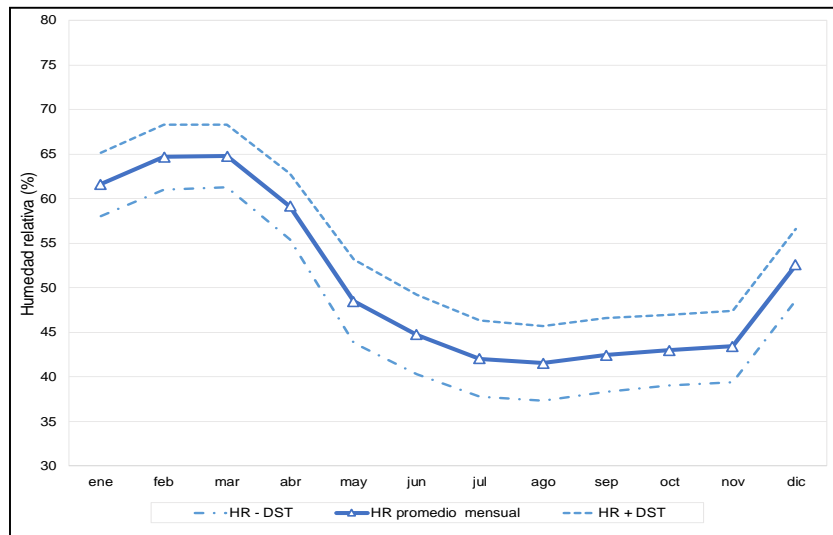


FUENTE: Elaboración propia

**Figura 24** Temperatura Máxima Promedio Mensual en la parte Baja de la Zona de Estudio hidrológico

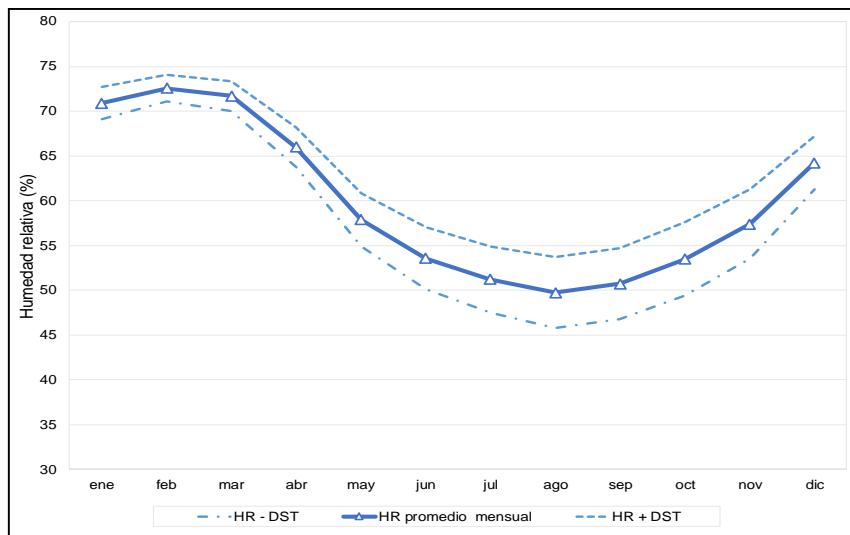
### 2.3.2 HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa en la parte alta de la zona de estudio, en esta se nota que los valores de 60% de humedad relativa en los meses lluviosos descienden hasta 40% en los meses secos (junio a noviembre). Esta misma tendencia se nota en la parte baja de la zona de estudio, pero los valores son superiores por 10 % en todas las temporadas.



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 25** Humedad Relativa Promedio Mensual en la parte Alta de la zona de Estudio Hidrológico



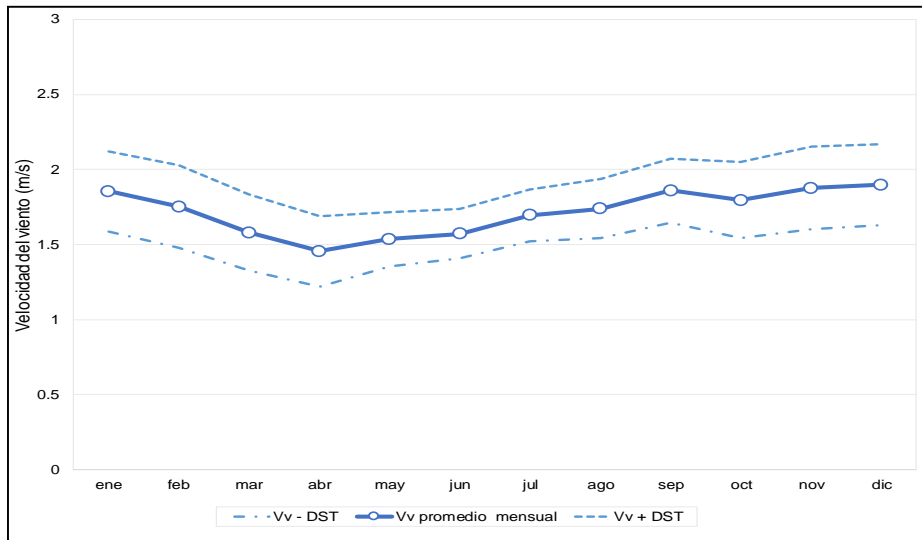
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 26** Humedad Relativa Promedio Mensual en la parte Baja de la Zona de Estudio Hidrológico

### 2.3.3 VELOCIDAD DEL VIENTO

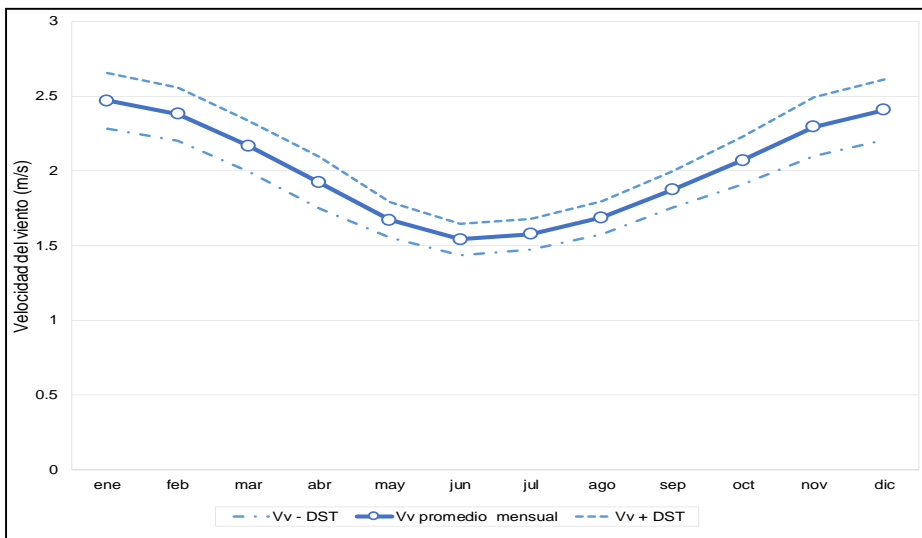
La velocidad del viento es casi nula en la parte alta de la zona de estudio con promedios de 1.5 a 2 m/s. Mientras que en la parte baja (FUENTE: Elaboración propia

Figura 28), se puede notar una mayor variabilidad (1 m/s entre temporadas). con promedios anuales de 2.5 m/s en la época húmeda y 1.5 en la época seca.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 27 Velocidad del Viento Promedio Mensual en la parte Alta de la Zona de Estudio Hidrológico



FUENTE: Elaboración propia

## **Figura 28 Velocidad del Viento Promedio Mensual en la parte Baja de la Zona de Estudio Hidrológico**

### **2.4 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA.**

#### **2.4.1 HIDROGRAFÍA**

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) establece mediante la resolución ministerial RM-022-2008-AG que el método de delimitación y codificación de unidades hidrográficas para el Perú es la metodología de Pfafstetter, sistema desarrollado por el Ing. Otto Pfafstetter. En ese contexto el área de estudio hidrológico se enmarca en dos cuencas regionales que pertenecen a la vertiente del Pacífico. La primera es la cuenca Camaná (UH: 134) y la otra es la cuenca Quilca-Vitor-Chili (UH: 132). Estas unidades hidrográficas han sido ubicadas espacialmente en la **Figura 29**.

La cuenca Camaná se ubica políticamente en la zona sur del Perú, forma parte del departamento Arequipa, tiene una extensión aproximada de 17460 km<sup>2</sup>. El recorrido de sus aguas comienza por el río Colca con aproximadamente 290 km, el cual al juntarse con el río Llacllajo forma el río Majes que al recorrer 83 km desemboca en el Océano Pacífico llevando el nombre de río Colca en los últimos 32 km de recorrido.

La cuenca Quilca-Vitor-Chili lleva este nombre por contener las aguas de estos tres ríos. Su extensión es de 13157 km<sup>2</sup> aproximadamente y abarca el departamento de Arequipa. El recorrido de sus aguas inicia en el río Chili, que luego de un recorrido de 87 km forma el río Vitor cuando se une con el río Yura. Finalmente, el río Vitor, al recorrer 80 km y encontrarse con el río Sihuas forma el río Quilca el cual recorre otros 24 km hasta desembocar en el Océano Pacífico.

La cuenca del río Sigwas, integrante de la cuenca del río Quilca, se ubica en la margen derecha de dicho río, se desarrolla en el flanco oeste de la Cordillera Occidental de los Andes peruanos, sus cursos más extremos nacen en los nevados (volcanes) Ampato y Sabancaya, a una altitud de 6100 msnm. Esta cuenca limita tanto al norte, noreste y oeste, con la cuenca hidrográfica del Colca, al sureste con la subcuenca del río Yura, afluente del río Uchumayo – Vitor y al Sur con la subcuenca del río Vitor. El recorrido promedio del río Sigwas es de 79.6 km.

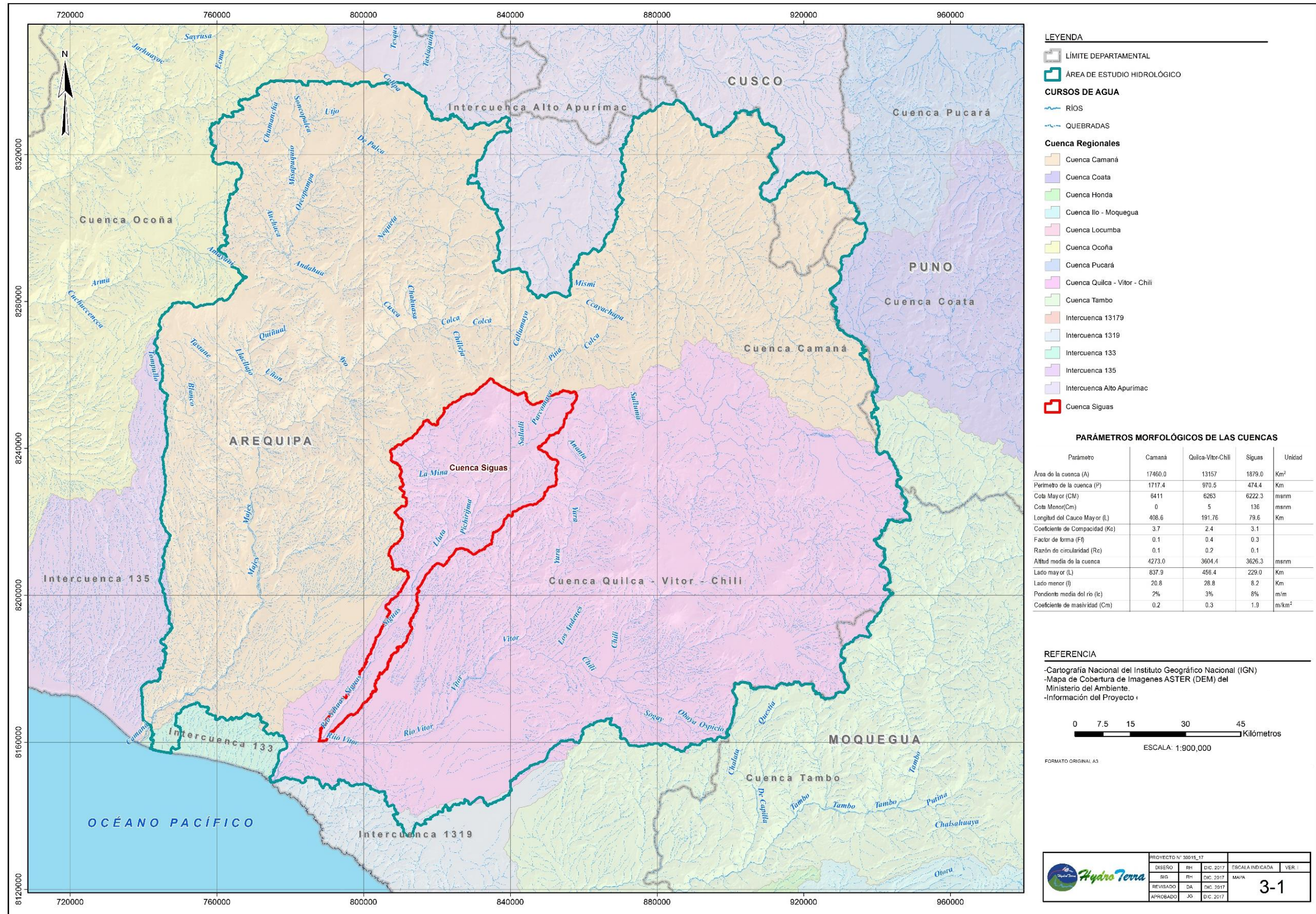


Figura 29 Hidrografía Regional

## 2.4.2 PARÁMETROS MORFOLÓGICOS

En este capítulo se analizó los principales parámetros morfológicos de las cuencas Camaná-Majes-Colca, Quilca-Vitor-Chili y Sigwas.

### Área de Drenaje

El área que comprende las cuencas Camaná-Majes-Colca, Quilca-Vitor-Chili y Sigwas es 17,460 km<sup>2</sup>, 13,157 km<sup>2</sup> y 1,879 km<sup>2</sup> respectivamente.

### Longitud de la cuenca (Perímetro de la cuenca)

Es la distancia medida de la línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas.

La longitud que encierra la cuenca Camaná, Quilca-Vitor-Chili y Sigwas es de 1717.4, 970.5 y 474.4 km respectivamente.

### Curva Hipsométrica

La curva hipsométrica es una descripción de la relación entre la altitud y el acumulado de las áreas con intervalos de elevación.

La **Figura 30** muestra la curva hipsométrica de la cuenca Camaná, esta fue determinada a partir de los valores mostrados en la **Tabla 9**.

**Tabla 9 Curva Hipsométrica de la Cuenca Camaná**

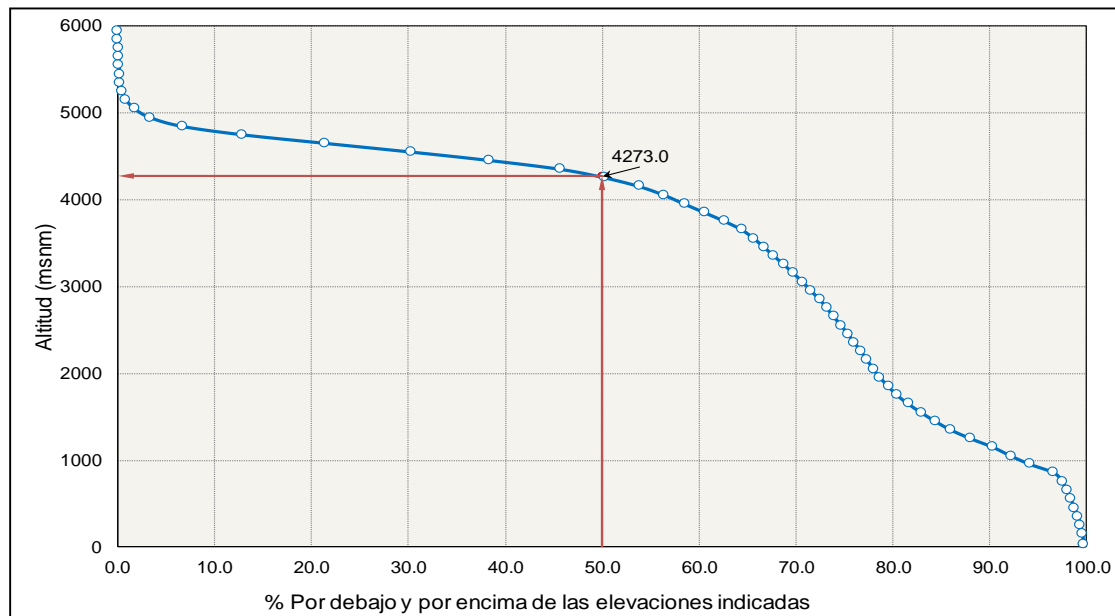
| <i>Cota Baja<br/>(msnm)</i> | <i>Cota Alta<br/>(msnm)</i> | <i>Altitud media<br/>de cada área<br/>parcial</i> | <i>Áreas parciales<br/>(km<sup>2</sup>)</i> | <i>Áreas que<br/>están debajo de<br/>la altitud (km<sup>2</sup>)</i> | <i>% del área que<br/>está debajo de<br/>la altitud</i> |
|-----------------------------|-----------------------------|---|---|--|---|
| 0                           | 100                         | 33.8  | 48.9  | 48.9   | 0.3   |
| 101                         | 200                         | 151.2   | 25.5  | 74.4   | 0.4   |
| 201                         | 300                         | 255.5   | 35.1  | 109.5  | 0.6   |
| 301                         | 400                         | 350.8   | 43.3  | 152.8  | 0.9   |
| 401                         | 500                         | 449.4   | 60.9  | 213.7  | 1.2   |
| 501                         | 600                         | 550.1   | 67.2  | 280.9  | 1.6   |
| 601                         | 700                         | 651.4   | 67.0  | 347.9  | 2.0   |
| 701                         | 800                         | 753.9   | 89.3  | 437.2  | 2.5   |
| 801                         | 900                         | 857.1   | 150.8                                       | 588.0  | 3.4   |
| 901                         | 1000                        | 955.0   | 426.9                                       | 1014.9   | 5.8   |
| 1001                        | 1100                        | 1047.9  | 337.5                                       | 1352.5   | 7.7   |
| 1101                        | 1200                        | 1151.6  | 332.2                                       | 1684.7   | 9.6   |

| <b>Cota Baja<br/>(msnm)</b> | <b>Cota Alta<br/>(msnm)</b> | <b>Altitud media<br/>de cada área<br/>parcial</b> | <b>Áreas parciales<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>Áreas que<br/>están debajo de<br/>la altitud (km<sup>2</sup>)</b> | <b>% del área que<br/>está debajo de<br/>la altitud</b> |
|-----------------------------|-----------------------------|---|---|--|---|
| 1201                        | 1300                        | 1249.3  | 396.2                                       | 2080.9   | 11.9  |
| 1301                        | 1400                        | 1349.8  | 360.9                                       | 2441.8   | 14.0  |
| 1401                        | 1500                        | 1448.7  | 282.6                                       | 2724.4   | 15.6  |
| 1501                        | 1600                        | 1550.0  | 253.2                                       | 2977.6   | 17.1  |
| 1601                        | 1700                        | 1649.3  | 232.9                                       | 3210.4   | 18.4  |
| 1701                        | 1800                        | 1749.4  | 201.6                                       | 3412.0   | 19.5  |
| 1801                        | 1900                        | 1848.4  | 156.9                                       | 3568.9   | 20.4  |
| 1901                        | 2000                        | 1949.7  | 147.4                                       | 3716.3   | 21.3  |
| 2001                        | 2100                        | 2049.3  | 122.6                                       | 3839.0   | 22.0  |
| 2101                        | 2200                        | 2149.8  | 110.7                                       | 3949.7   | 22.6  |
| 2201                        | 2300                        | 2251.2  | 110.6                                       | 4060.3   | 23.3  |
| 2301                        | 2400                        | 2350.2  | 119.1                                       | 4179.4   | 23.9  |
| 2401                        | 2500                        | 2451.0  | 115.6                                       | 4294.9   | 24.6  |
| 2501                        | 2600                        | 2551.0  | 125.9                                       | 4420.8   | 25.3  |
| 2601                        | 2700                        | 2650.5  | 129.4                                       | 4550.2   | 26.1  |
| 2701                        | 2800                        | 2750.3  | 128.4                                       | 4678.6   | 26.8  |
| 2801                        | 2900                        | 2851.0  | 129.3                                       | 4808.0   | 27.5  |
| 2901                        | 3000                        | 2949.2  | 154.5                                       | 4962.4   | 28.4  |
| 3001                        | 3100                        | 3051.8  | 149.1                                       | 5111.5   | 29.3  |
| 3101                        | 3200                        | 3151.5  | 166.1                                       | 5277.6   | 30.2  |
| 3201                        | 3300                        | 3251.3  | 173.5                                       | 5451.0   | 31.2  |
| 3301                        | 3400                        | 3350.6  | 178.3                                       | 5629.3   | 32.2  |
| 3401                        | 3500                        | 3450.5  | 176.9                                       | 5806.2   | 33.3  |
| 3501                        | 3600                        | 3551.0  | 183.2                                       | 5989.4   | 34.3  |
| 3601                        | 3700                        | 3653.2  | 221.8                                       | 6211.2   | 35.6  |
| 3701                        | 3800                        | 3751.1  | 307.7                                       | 6518.8   | 37.3  |
| 3801                        | 3900                        | 3850.7  | 358.9                                       | 6877.7   | 39.4  |
| 3901                        | 4000                        | 3950.4  | 364.8                                       | 7242.5   | 41.5  |
| 4001                        | 4100                        | 4051.3  | 365.0                                       | 7607.5   | 43.6  |
| 4101                        | 4200                        | 4152.4  | 448.5                                       | 8056.0   | 46.1  |
| 4201                        | 4300                        | 4254.3  | 632.3                                       | 8688.4   | 49.8  |
| 4301                        | 4400                        | 4351.3  | 789.9                                       | 9478.3   | 54.3  |
| 4401                        | 4500                        | 4453.3  | 1278.5                                      | 10756.9  | 61.6  |
| 4501                        | 4600                        | 4550.7  | 1415.4                                      | 12172.2  | 69.7  |
| 4601                        | 4700                        | 4650.8  | 1547.1                                      | 13719.3  | 78.6  |
| 4701                        | 4800                        | 4749.7  | 1493.8                                      | 15213.1  | 87.1  |
| 4801                        | 4900                        | 4845.7  | 1081.2                                      | 16294.4  | 93.3  |
| 4901                        | 5000                        | 4944.8  | 570.9                                       | 16865.3  | 96.6  |
| 5001                        | 5100                        | 5045.1  | 285.4                                       | 17150.7  | 98.2  |
| 5101                        | 5200                        | 5145.9  | 154.3                                       | 17305.0  | 99.1  |
| 5201                        | 5300                        | 5243.2  | 74.4  | 17379.4  | 99.5  |
| 5301                        | 5400                        | 5344.7  | 32.6  | 17412.0  | 99.7  |
| 5401                        | 5500                        | 5444.1  | 14.2  | 17426.3  | 99.8  |



| <b>Cota Baja (msnm)</b> | <b>Cota Alta (msnm)</b> | <b>Altitud media de cada área parcial</b> | <b>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</b> | <b>Áreas que están debajo de la altitud (km<sup>2</sup>)</b> | <b>% del área que está debajo de la altitud</b> |
|-------------------------|-------------------------|---|---|--|---|
| 5501                    | 5600                    | 5546.0                                    | 8.2                                     | 17434.4  | 99.9  |
| 5601                    | 5700                    | 5649.7                                    | 5.9                                     | 17440.3  | 99.9  |
| 5701                    | 5800                    | 5750.2                                    | 6.0                                     | 17446.4  | 99.9  |
| 5801                    | 5900                    | 5847.5                                    | 5.3                                     | 17451.6  | 100.0   |
| 5901                    | 6000                    | 5943.0                                    | 3.4                                     | 17455.1  | 100.0   |
| 6001                    | 6100                    | 6049.8                                    | 2.2                                     | 17457.3  | 100.0   |
| 6101                    | 6200                    | 6146.1                                    | 1.6                                     | 17458.9  | 100.0   |
| 6201                    | 6300                    | 6239.0                                    | 0.7                                     | 17459.6  | 100.0   |
| 6301                    | 6400                    | 6343.2                                    | 0.4                                     | 17460.0  | 100.0   |
| 6401                    | 6411                    | 6406.6                                    | 0.0                                     | 17460.0  | 100.0   |
| <b>Total</b>            |                         |   | <b>17460.0</b>                          |  |   |

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 30 Curva Hipsométrica de la Cuenca Camaná-Majes-Colca**

FUENTE: Elaboración propia

De la gráfica se tiene que la altitud media de la cuenca Camaná se da a 4273 msnm., que representa el 50% del área total de la cuenca. La *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* muestra la curva hipsométrica de la cuenca Quilca-Vitor-Chili, esta fue determinada a partir de los valores mostrados en la **Tabla 10**.

**Tabla 10 Curva Hipsométrica de la Cuenca Quilca-Vitor-Chili**

| <b>Cota Baja<br/>(msnm)</b> | <b>Cota Alta<br/>(msnm)</b> | <b>Altitud media de<br/>cada área<br/>parcial</b> | <b>Áreas parciales<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>Áreas que están<br/>debajo de la<br/>altitud (km<sup>2</sup>)</b> | <b>% del área que<br/>está debajo de la<br/>altitud</b> |
|-----------------------------|-----------------------------|---|---|--|---|
| 5                           | 100                         | 40.2  | 12.7  | 12.7   | 0.1   |
| 101                         | 200                         | 153.3   | 10.0  | 22.7   | 0.1   |
| 201                         | 300                         | 250.4   | 12.5  | 35.2   | 0.2   |
| 301                         | 400                         | 352.4   | 14.6  | 49.8   | 0.3   |
| 401                         | 500                         | 451.4   | 16.3  | 66.2   | 0.4   |
| 501                         | 600                         | 552.7   | 20.3  | 86.5   | 0.5   |
| 601                         | 700                         | 652.1   | 24.2  | 110.7  | 0.6   |
| 701                         | 800                         | 753.2   | 31.5  | 142.2  | 0.8   |
| 801                         | 900                         | 854.6   | 46.5  | 188.7  | 1.0   |
| 901                         | 1000                        | 963.1   | 169.8                                       | 358.5  | 1.9   |
| 1001                        | 1100                        | 1058.7  | 437.6                                       | 796.1  | 4.3   |
| 1101                        | 1200                        | 1151.2  | 836.2                                       | 1632.3   | 8.8   |
| 1201                        | 1300                        | 1247.4  | 772.8                                       | 2405.1   | 12.9  |
| 1301                        | 1400                        | 1348.8  | 541.2                                       | 2946.2   | 15.8  |
| 1401                        | 1500                        | 1449.6  | 450.9                                       | 3397.1   | 18.2  |
| 1501                        | 1600                        | 1550.1  | 401.5                                       | 3798.6   | 20.4  |
| 1601                        | 1700                        | 1648.2  | 318.3                                       | 4117.0   | 22.1  |
| 1701                        | 1800                        | 1750.0  | 273.2                                       | 4390.2   | 23.6  |
| 1801                        | 1900                        | 1849.4  | 256.8                                       | 4647.0   | 24.9  |
| 1901                        | 2000                        | 1951.0  | 241.3                                       | 4888.2   | 26.2  |
| 2001                        | 2100                        | 2049.8  | 235.8                                       | 5124.1   | 27.5  |
| 2101                        | 2200                        | 2151.3  | 247.0                                       | 5371.1   | 28.8  |
| 2201                        | 2300                        | 2251.0  | 268.4                                       | 5639.5   | 30.3  |
| 2301                        | 2400                        | 2350.3  | 260.1                                       | 5899.6   | 31.7  |
| 2401                        | 2500                        | 2451.4  | 277.4                                       | 6177.0   | 33.2  |
| 2501                        | 2600                        | 2550.5  | 276.6                                       | 6453.7   | 34.6  |
| 2601                        | 2700                        | 2650.3  | 258.5                                       | 6712.1   | 36.0  |
| 2701                        | 2800                        | 2749.5  | 242.4                                       | 6954.6   | 37.3  |
| 2801                        | 2900                        | 2851.0  | 237.5                                       | 7192.1   | 38.6  |
| 2901                        | 3000                        | 2951.7  | 252.9                                       | 7445.0   | 40.0  |
| 3001                        | 3100                        | 3050.7  | 288.1                                       | 7733.1   | 41.5  |
| 3101                        | 3200                        | 3150.8  | 295.8                                       | 8028.9   | 43.1  |
| 3201                        | 3300                        | 3250.4  | 307.1                                       | 8336.0   | 44.7  |
| 3301                        | 3400                        | 3350.0  | 285.9                                       | 8621.9   | 46.3  |
| 3401                        | 3500                        | 3450.1  | 280.3                                       | 8902.2   | 47.8  |
| 3501                        | 3600                        | 3550.3  | 265.6                                       | 9167.9   | 49.2  |
| 3601                        | 3700                        | 3650.7  | 273.4                                       | 9441.3   | 50.7  |
| 3701                        | 3800                        | 3752.3  | 311.4                                       | 9752.7   | 52.3  |
| 3801                        | 3900                        | 3850.3  | 363.6                                       | 10116.3  | 54.3  |
| 3901                        | 4000                        | 3951.6  | 387.0                                       | 10503.4  | 56.4  |
| 4001                        | 4100                        | 4055.5  | 554.4                                       | 11057.7  | 59.3  |

| <b>Cota Baja (msnm)</b> | <b>Cota Alta (msnm)</b> | <b>Altitud media de cada área parcial</b> | <b>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</b> | <b>Áreas que están debajo de la altitud (km<sup>2</sup>)</b> | <b>% del área que está debajo de la altitud</b> |
|-------------------------|-------------------------|---|---|--|---|
| 4101                    | 4200                    | 4152.4                                    | 649.3                                   | 11707.1  | 62.8  |
| 4201                    | 4300                    | 4255.8                                    | 771.5                                   | 12478.5  | 67.0  |
| 4301                    | 4400                    | 4344.4                                    | 1312.3                                  | 13790.8  | 74.0  |
| 4401                    | 4500                    | 4450.6                                    | 1368.0                                  | 15158.8  | 81.4  |
| 4501                    | 4600                    | 4548.8                                    | 1081.7                                  | 16240.5  | 87.2  |
| 4601                    | 4700                    | 4647.2                                    | 869.5                                   | 17109.9  | 91.8  |
| 4701                    | 4800                    | 4746.9                                    | 577.2                                   | 17687.2  | 94.9  |
| 4801                    | 4900                    | 4846.6                                    | 398.5                                   | 18085.7  | 97.1  |
| 4901                    | 5000                    | 4944.4                                    | 220.2                                   | 18305.9  | 98.3  |
| 5001                    | 5100                    | 5045.6                                    | 121.8                                   | 18427.7  | 98.9  |
| 5101                    | 5200                    | 5146.4                                    | 64.6                                    | 18492.3  | 99.3  |
| 5201                    | 5300                    | 5246.8                                    | 41.6                                    | 18534.0  | 99.5  |
| 5301                    | 5400                    | 5347.4                                    | 26.8                                    | 18560.8  | 99.6  |
| 5401                    | 5500                    | 5447.6                                    | 21.8                                    | 18582.6  | 99.7  |
| 5501                    | 5600                    | 5548.2                                    | 15.5                                    | 18598.1  | 99.8  |
| 5601                    | 5700                    | 5648.5                                    | 11.8                                    | 18609.9  | 99.9  |
| 5701                    | 5800                    | 5747.7                                    | 9.0                                     | 18618.9  | 99.9  |
| 5801                    | 5900                    | 5845.3                                    | 6.4                                     | 18625.3  | 100.0   |
| 5901                    | 6000                    | 5942.2                                    | 3.1                                     | 18628.4  | 100.0   |
| 6001                    | 6100                    | 6038.3                                    | 1.1                                     | 18629.5  | 100.0   |
| 6101                    | 6200                    | 6159.3                                    | 0.9                                     | 18630.4  | 100.0   |
| 6201                    | 6263                    | 6222.3                                    | 0.3                                     | 18630.6  | 100.0   |
| <b>Total</b>            |                         |   | <b>18630.6255</b>                       |  |   |

FUENTE: Elaboración propia

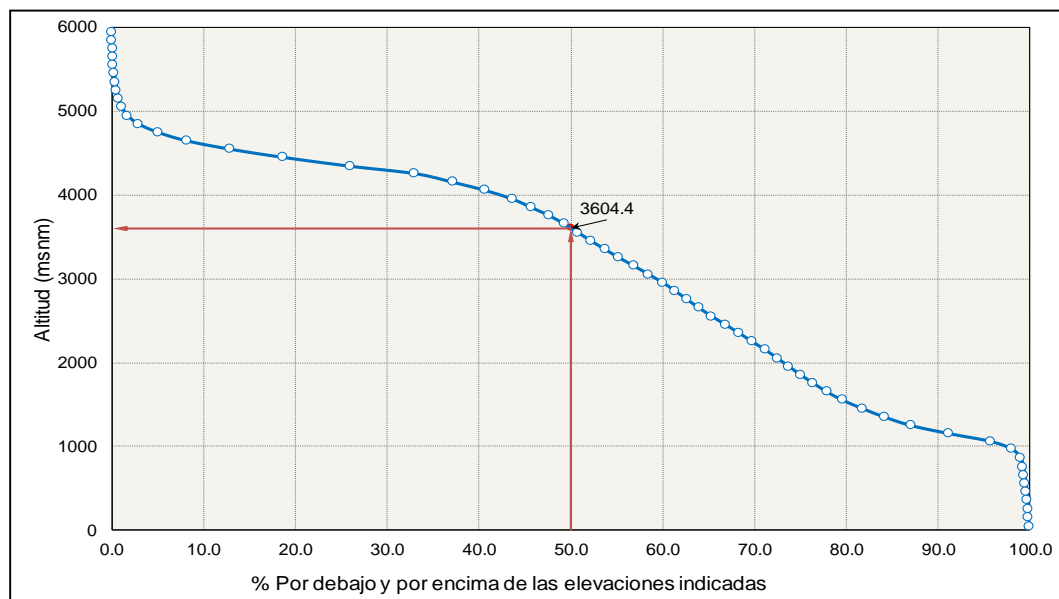


Figura 31 Curva Hipsométrica de la Cuenca Quilca-Vitor-Chili

De la gráfica se tiene que la altitud media de la cuenca Quilca-Vitor-Chili se da 3604 msnm., que representa el 50% del área total de la cuenca.

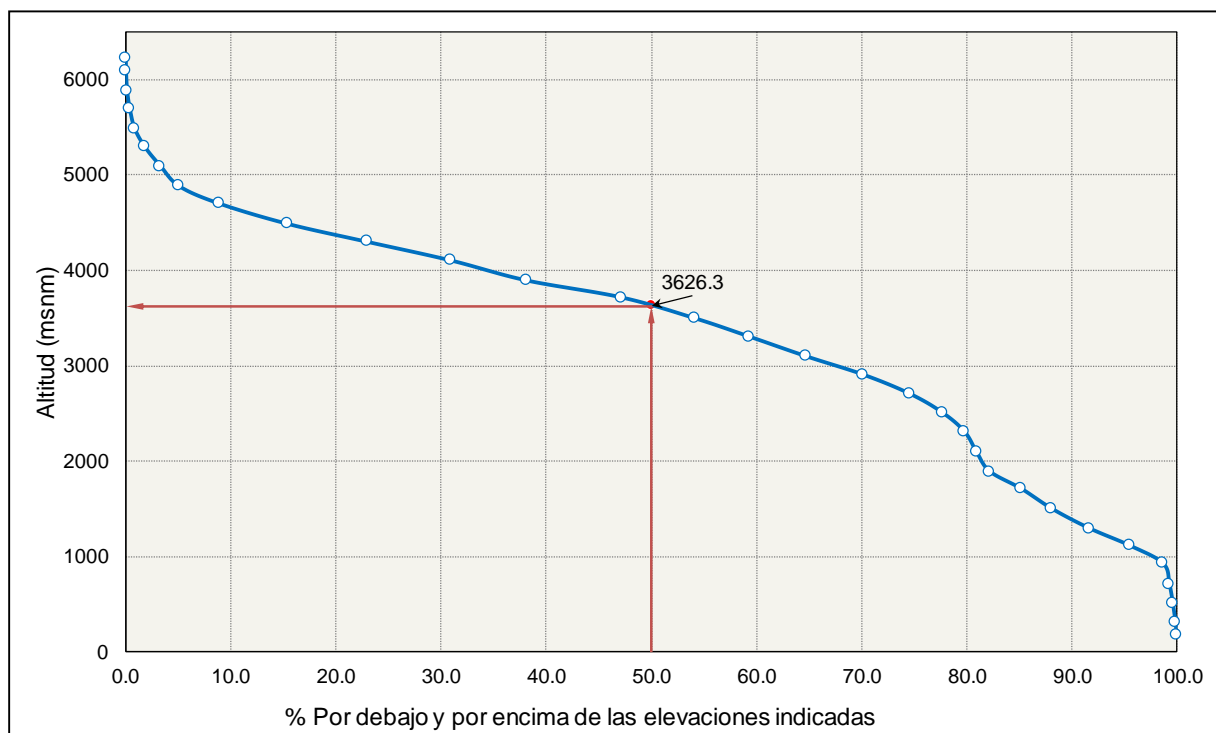
La **Figura 32** muestra la curva hipsométrica de la cuenca Sigwas, esta fue determinada a partir de los valores mostrados en la **Tabla 11**.

**Tabla 11** Curva Hipsométrica de la Cuenca Sigwas

| <i>Cota Baja (msnm)</i> | <i>Cota Alta (msnm)</i> | <i>Altitud media de cada área parcial</i> | <i>Áreas parciales (km<sup>2</sup>)</i> | <i>Áreas que están debajo de la altitud (km<sup>2</sup>)</i> | <i>% del área que está debajo de la altitud</i> |
|-------------------------|-------------------------|---|---|--|---|
| 136                     | 200                     | 171.6                                     | 0.3                                     | 0.3  | 0.0   |
| 201                     | 400                     | 315.3                                     | 2.4                                     | 2.8  | 0.1   |
| 401                     | 600                     | 506.1                                     | 4.5                                     | 7.3  | 0.4   |
| 601                     | 800                     | 704.4                                     | 6.0                                     | 13.3   | 0.7   |
| 801                     | 1000                    | 925.8                                     | 11.4                                    | 24.6   | 1.3   |
| 1001                    | 1200                    | 1112.9                                    | 59.7                                    | 84.4   | 4.5   |
| 1201                    | 1400                    | 1294.2                                    | 72.4                                    | 156.8  | 8.3   |
| 1401                    | 1600                    | 1498.3                                    | 66.5                                    | 223.3  | 11.9  |
| 1601                    | 1800                    | 1706.3                                    | 54.1                                    | 277.4  | 14.8  |
| 1801                    | 2000                    | 1889.8                                    | 57.0                                    | 334.4  | 17.8  |
| 2001                    | 2200                    | 2089.5                                    | 23.4                                    | 357.8  | 19.0  |
| 2201                    | 2400                    | 2307.0                                    | 21.8                                    | 379.5  | 20.2  |
| 2401                    | 2600                    | 2509.3                                    | 40.2                                    | 419.7  | 22.3  |
| 2601                    | 2800                    | 2705.3                                    | 57.9                                    | 477.6  | 25.4  |
| 2801                    | 3000                    | 2905.9                                    | 83.4                                    | 561.0  | 29.9  |
| 3001                    | 3200                    | 3098.5                                    | 102.3                                   | 663.3  | 35.3  |
| 3201                    | 3400                    | 3303.7                                    | 100.8                                   | 764.1  | 40.7  |
| 3401                    | 3600                    | 3498.2                                    | 98.7                                    | 862.8  | 45.9  |
| 3601                    | 3800                    | 3714.5                                    | 129.5                                   | 992.3  | 52.8  |
| 3801                    | 4000                    | 3894.0                                    | 171.0                                   | 1163.3   | 61.9  |
| 4001                    | 4200                    | 4102.0                                    | 134.1                                   | 1297.3   | 69.0  |
| 4201                    | 4400                    | 4298.8                                    | 150.6                                   | 1447.9   | 77.1  |
| 4401                    | 4600                    | 4487.9                                    | 142.8                                   | 1590.7   | 84.7  |
| 4601                    | 4800                    | 4700.7                                    | 121.9                                   | 1712.6   | 91.1  |
| 4801                    | 5000                    | 4881.5                                    | 70.9                                    | 1783.5   | 94.9  |
| 5001                    | 5200                    | 5092.2                                    | 33.5                                    | 1817.0   | 96.7  |
| 5201                    | 5400                    | 5290.9                                    | 27.7                                    | 1844.6   | 98.2  |
| 5401                    | 5600                    | 5486.5                                    | 18.6                                    | 1863.2   | 99.2  |
| 5601                    | 5800                    | 5691.7                                    | 8.7                                     | 1871.8   | 99.6  |

| Cota Baja (msnm) | Cota Alta (msnm) | Altitud media de cada área parcial | Áreas parciales (km <sup>2</sup> ) | Áreas que están debajo de la altitud (km <sup>2</sup> ) | % del área que está debajo de la altitud |
|------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|--|
| 5801             | 6000             | 5884.9                             | 4.9                                | 1876.7  | 99.9                                     |
| 6001             | 6200             | 6092.9                             | 1.9                                | 1878.7  | 100.0                                    |
| 6201             | 6263             | 6222.3                             | 0.3                                | 1879.0  | 100.0                                    |
| <b>Total</b>     |                  |                                    | <b>1879.0</b>                      |   |  |

FUENTE: Elaboración propia



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 32 Curva Hipsométrica de la Cuenca Siguas**

De la gráfica se tiene que la altitud media de la cuenca Siguas se da a los 3626.3 msnm., que representa el 50% del área total de la cuenca.

### **Coefficiente de Compacidad (Kc)**

El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius, se calcula de la relación entre el perímetro (P) y el área de la cuenca (A).

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Valores por encima de 1.75 indican que la cuenca tiene una forma oval oblonga. Es el caso de todas las cuencas de análisis (Camaná, Quilca-Vitor-Chili y Siguas con 3.7, 2.4 y 3.1 respectivamente).

### **Factor de Forma (Ff)**

El factor de forma nos da una idea de la geometría de la cuenca, se calcula de la relación entre el área (A) y la longitud del cauce principal (L)

$$Ff = \frac{A}{L^2}$$

La cuenca Camaná con un factor de forma de 0.1, la cuenca Quilca-Vitor-Chili con 0.4 y la cuenca Siguas con 0.3 tienen tendencias baja susceptibilidad a la formación de avenidas.

### **Rectángulo equivalente**

Los lados del rectángulo equivalente están dados por las siguientes relaciones:

$$l = \frac{Kc}{1.12} \sqrt{A} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right] \quad L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right]$$

Para la cuenca Camaná: el lado menor es  $l = 20.8 \text{ km}$  y el lado mayor es  $L = 837.9 \text{ km}$ .

Para la cuenca Quilca-Vitor-Chili: el lado menor es  $l = 28.8 \text{ km}$  y el lado mayor es  $L = 456.4 \text{ km}$ .

Para la cuenca Siguas el lado menor es  $l = 8.2 \text{ km}$  y el lado mayor es  $L = 229.0 \text{ km}$ .

### **Pendiente Media del Río**

La pendiente media es igual al desnivel entre los extremos de la corriente dividida entre su longitud medida en planta:

$$lc = \frac{HM - Hm}{L}$$

La pendiente del curso de agua de la cuenca Camaná es 2%, de la cuenca Quilca-Vitor-Chili 3% y de la cuenca Siguas 7.6%. Al ser todas las pendientes medias medianamente accidentadas, el almacenamiento es tardío en las partes altas de la cuenca, por tanto, la recarga se ve desfavorecida.

### Coefficiente de Masividad (Cm)

Este índice expresa la relación entre la altitud media de la cuenca (H) y el área total de la misma (A), y esta expresada en m/km<sup>2</sup>, y se obtiene por la siguiente expresión:

$$Cm = \frac{H}{A}$$

En la **Tabla 122** se presenta un resumen de los principales parámetros morfológicos de la cuenca Camaná, Quilca-Vitor-Chili y Sigvas

**Tabla 12 Parámetros Morfológicos de las Cuencas Camaná-Majes-Colca, Quilca-Vitor-Chili y Sigvas**

| <i>Parámetro</i>                | <i>Camaná</i> | <i>Quilca-Vitor-Chili</i> | <i>Sigvas</i> | <i>Unidad</i>     |
|---------------------------------|---------------|---------------------------|---------------|-------------------|
| Área de la cuenca (A)           | 17460.0       | 13157                     | 1879.0        | km <sup>2</sup>   |
| Perímetro de la cuenca (P)      | 1717.4        | 970.5                     | 474.4         | Km                |
| Cota Mayor (CM)                 | 6411          | 6263                      | 6222.3        | msnm              |
| Cota Menor(Cm)                  | 0             | 5                         | 136           | msnm              |
| Longitud del Cauce Mayor (L)    | 408.6         | 191.76                    | 79.6          | Km                |
| Coefficiente de Compacidad (Kc) | 3.7           | 2.4                       | 3.1           |                   |
| Factor de forma (Ff)            | 0.1           | 0.4                       | 0.3           |                   |
| Razón de circularidad (Rc)      | 0.1           | 0.2                       | 0.1           |                   |
| Altitud media de la cuenca      | 4273.0        | 3604.4                    | 3626.3        | msnm              |
| Lado mayor (L)                  | 837.9         | 456.4                     | 229.0         | Km                |
| Lado menor (l)                  | 20.8          | 28.8                      | 8.2           | Km                |
| Pendiente media del río (lc)    | 2%            | 3%                        | 8%            | m/m               |
| Coefficiente de masividad (Cm)  | 0.2           | 0.3                       | 1.9           | m/km <sup>2</sup> |

*FUENTE: Elaboración propia*

El resumen de los tiempos de concentración calculados para cada cuenca se resume en la siguiente tabla:

**Tabla 13 Tiempo de concentración de las cuencas de estudio**

| <b>Cuencas</b>     | <b>Tiempo de Concentración</b> |  |                                 | <b>Ponderado Tc (Hr)</b> | <b>Coef. Almacen K (Hr)</b> |
|--------------------|--------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
|                    | <b>Kirpich 1940 (min)</b>      | <b>California Culverts Practice (1942) (min)</b> | <b>Bransby - Williams (min)</b> |                          |                             |
| Camaná             | 2017.2                         | 2020.3   | 5156.1                          | 46                       | 59.8                        |
| Quilca-Vitor-Chili | 849.8                          | 851.1  | 2150.1                          | 19.3                     | 25.1                        |
| Sigvas             | 311.0                          | 311.4  | 914.0                           | 7.4                      | 9.7                         |

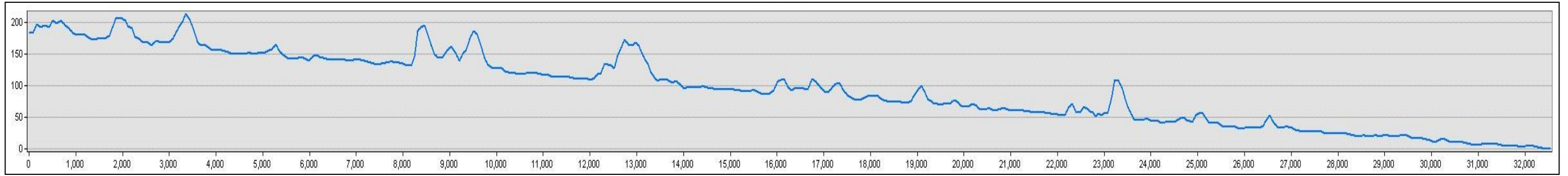
### **Perfil Longitudinal**

Los perfiles longitudinales fueron trazados de acuerdo al recorrido en planta por cada una de las cuencas. La cuenca Camaná contiene a los ríos Camaná, Majes y Colca, los cuales se muestran en las **Figura 33**, **Figura 34** y **Figura 35** respectivamente.

Por otro lado, los ríos de la cuenca Quilca-Vitor-Chili se muestran en las **Figura 36**, **Figura 37** y **Figura 38** de acuerdo al recorrido en planta mostrado en la **Figura 18**.

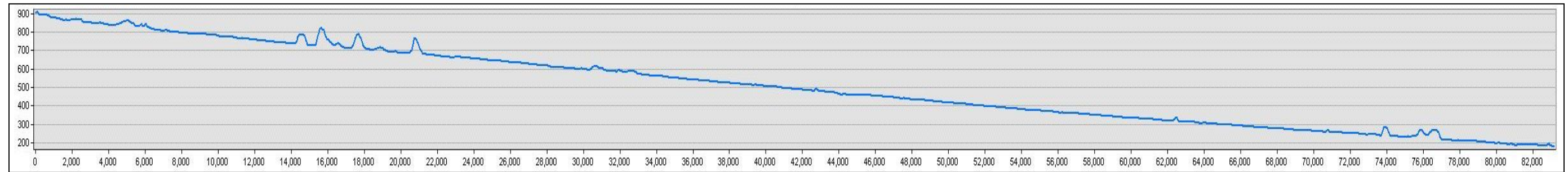
Finalmente, el perfil del río Sigwas se muestra en la **Figura 39**.





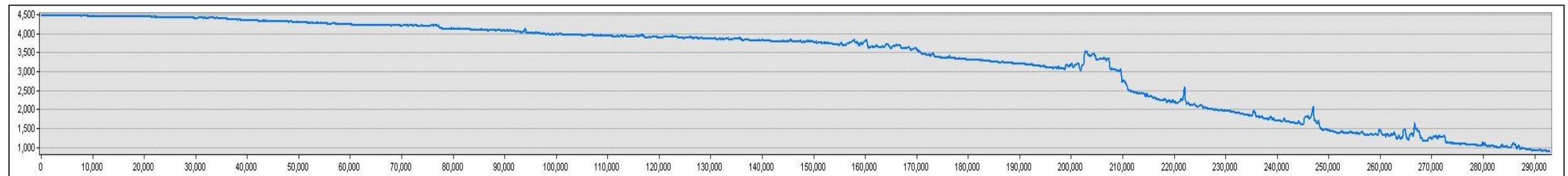
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 33** Perfil Longitudinal del río Camaná



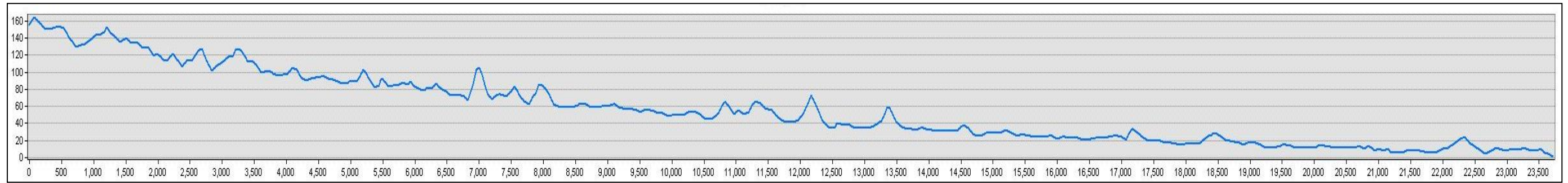
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 34** Perfil Longitudinal del río Majes



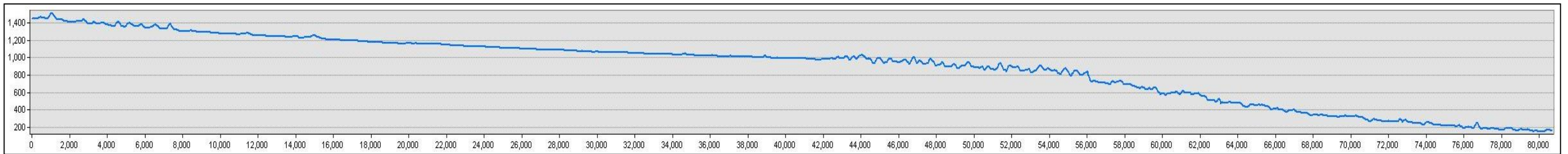
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 35** Perfil Longitudinal del río Colca



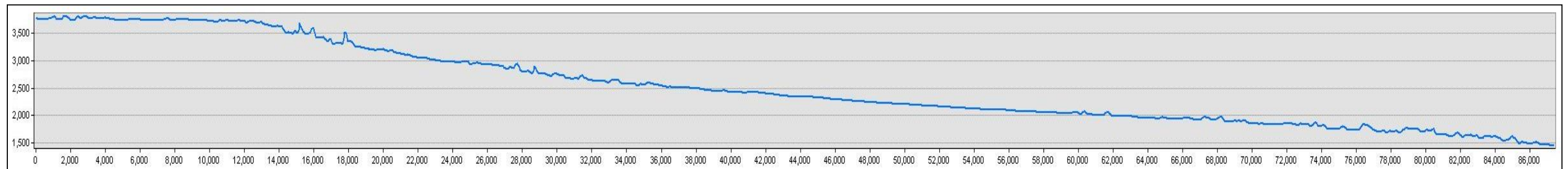
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 36 Perfil Longitudinal del río Quilca**



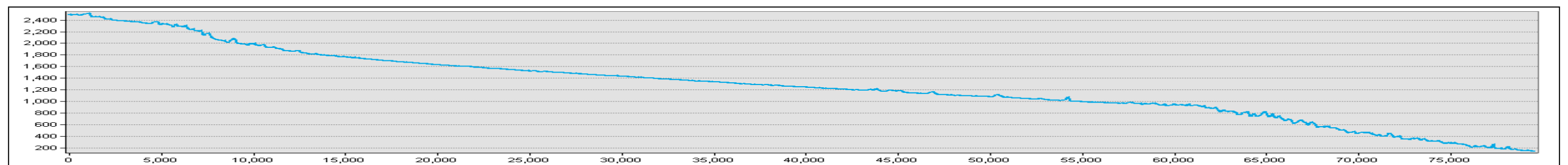
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 37 Perfil Longitudinal del río Vitor**



**Figura 38 Perfil Longitudinal del río Chili**

FUENTE: Elaboración propia



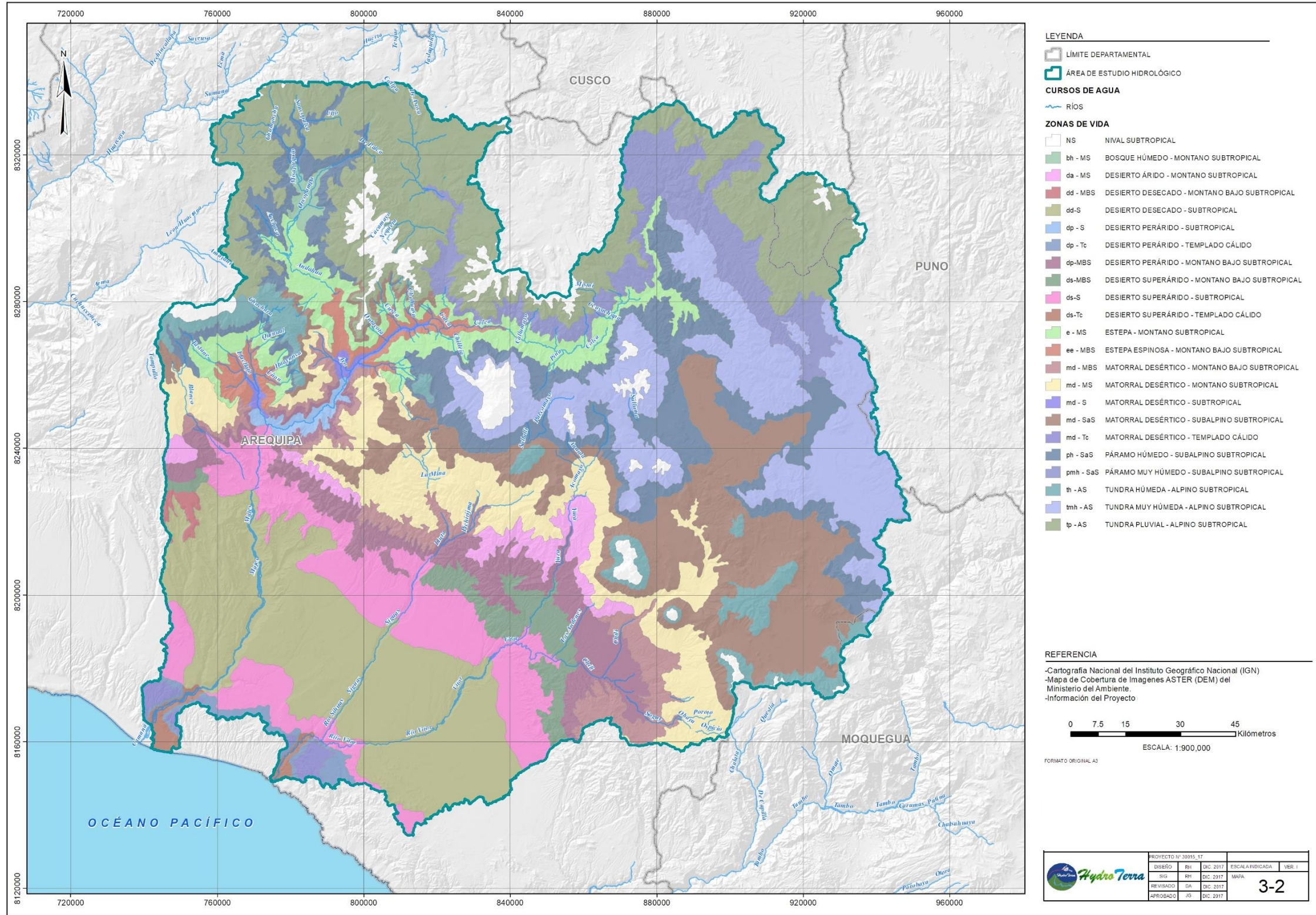
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 39 Perfil Longitudinal del río Sigwas**

### **2.4.3 ASPECTOS ECOLÓGICOS DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO**

Las zonas de vida que se presentan en el área de estudio han sido obtenidas de la información del “Mapa Ecológico del Perú”, elaborado por ONERN en el año 1976, el mismo que determina, de acuerdo al sistema establecido por L.R. Holdridge, la distribución geográfica de las Zonas de Vida existentes en el territorio nacional.

El área de estudio hidrológico atraviesa 23 zonas de vida. La distribución espacial se puede encontrar en la **Figura 40**.



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 40** Distribución de las Zonas de Vida

## 2.5 SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON EL MODELO SWAT.

### 2.5.1 ÁREA DE DOMINIO DEL MODELO Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA

#### a. Descripción General

Por las características de la zona de estudio y los datos disponibles se hace necesario utilizar el programa SWAT ya que es uno de los pocos softwares que utiliza la metodología aprobada por la FAO (Pennan Monteith) para determinar la evapotranspiración, componente sumamente importante para el balance hídrico de las cuencas. Además, puede incluir inputs meteorológicos a escala diaria, y dado que Hydroterra, cuenta con información pluviométrica diaria para 57 estaciones virtuales a lo largo de la zona de estudio desde el año 1998 y con información climática diaria de la NASA a partir del año 1983.

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas. Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes.

El SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para el modelamiento, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente el SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo con las coberturas presentes.

La hidrología del modelo se basa en el criterio de que el agua entra, sale y se almacena como lo describe la ecuación:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1} (Ri - Qi - ETi - Pi - QRi)$$

Donde:

**SW<sub>t</sub>:** Es el contenido de agua en el suelo el día t,

**SW:** Es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15 bar,

**t :** Es el tiempo en días,

- R :** Es la precipitación diaria,
- Q:** Es la cantidad de escorrentía diaria,
- ET:** Es la evapotranspiración diaria,
- P:** Es la percolación diaria y
- QR:** Es el flujo de retorno o flujo base;

Todas las unidades son en mm.

La cantidad de escorrentía es estimada aplicando la metodología del número de la curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, con datos de lluvia diarios. Esta ecuación se fundamenta en que la escorrentía está determinada por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en este se realice.

El agua que penetra en el suelo o infiltración puede tomar varios caminos: incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse subsuperficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos, donde ésta agua también llegara hasta los canales de drenaje y recargar acuíferos profundos. El SWAT considera flujo lateral, percolación y flujo de retorno.

El modelo SWAT ofrece tres métodos para la estimación de la evapotranspiración potencial: Penman-Monteith, Hargreaves and Sammami y Priestley – Taylor.

Las variables climáticas utilizadas como entradas por el SWAT son: la precipitación, la temperatura máxima y mínima del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa las cuales fueron suministradas y analizadas en los capítulos anteriores.

Como variables geomorfológicas de entrada al SWAT son: topografía, las definiciones de las cuencas de estudio, el tipo y uso de suelo, variables descritas continuación.

### **2.5.2 PLANTEAMIENTO DE LA SIMULACIÓN**

Las simulaciones se han concentrado entre enero del 1998 a marzo del 2017.

- La precipitación diaria disponible abarca desde el año 1998 hasta el año 2017 del satélite TRMM.

- Los datos meteorológicos diarios de temperatura máxima y mínima (°C), humedad relativa (%), radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>/día), velocidad del viento (m/s), se encuentran disponibles desde el 1 de enero de 1983 hasta marzo de 2017.
- La precipitación faltante desde 1983 hasta finales del año 1997, se han completado repitiendo la precipitación disponible.
- Las simulaciones son para el período completo desde 1998 hasta el 2017, considerando dos períodos para evaluar los resultados:
  - Período de spin off desde 1983 hasta finales del año 1997: Este período tiene como fin lograr la estabilización de contenido de agua en el suelo. Esto se debe a la importancia de esta variable en el control de la infiltración de agua en el suelo y de dar condiciones que se asemejen al contenido de humedad en el suelo antes de la simulación. Los resultados de este período no han influenciado los resultados reportados.
  - Período del 1998 al 2017: este período ha sido el válido para el análisis de los resultados.
- Al contar con un registro de datos hidrométricos en la estación Huatiapa de enero de 1998 hasta diciembre del 2014, se validará los caudales simulados mediante métodos gráficos e índices estadísticos que comparen lo observado con lo simulado.

Se ha corrido el modelo SWAT desde el 1° de enero del 1998 hasta el 31 de marzo del 2017. Con 15 años anteriores – desde 1983 hasta 1997 - como “spin up” o equilibrio de las variables hidrológicas, sobre todo el contenido de humedad del suelo. A partir del año 16 de simulación – desde 1998 - los resultados cuentan para los promedios y estadísticas. Con esta simulación se obtiene la hidrología promedio para el área de estudio hidrológico.

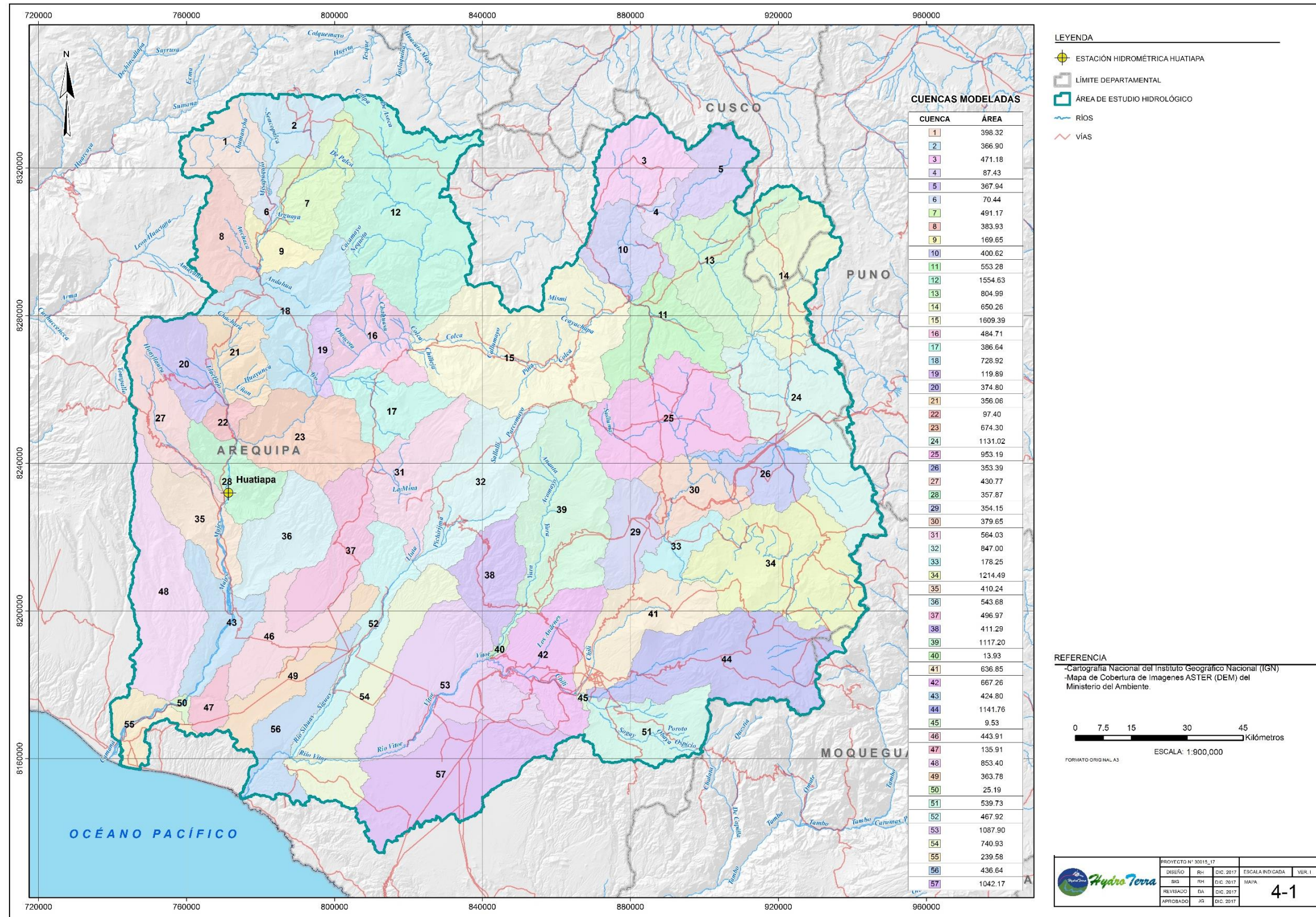
### **2.5.3 DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO HIDROLÓGICO**

El área de estudio hidrológico se enmarca principalmente en las cuencas regionales Camaná y Quilca-Vitor-Chili, las características de ambas cuencas han sido descritas en el **Capítulo 2.1** del presente informe.

Las cuencas modeladas y más discretizadas se encuentran dentro de estas dos cuencas regionales. La finalidad de la discretización es obtener las principales componentes del balance hídrico de acuerdo a los diferentes pisos altitudinales, con esto se logrará capturar la variabilidad de la percolación y la recarga que servirán como insumos para el modelo hidrogeológico.

En la **Figura 41** muestra el área de estudio hidrológico, esta se encuentra enmarcada en una línea de color verde. Las cuencas modeladas se representan con colores temáticos, y cuentan con un registro de sus áreas en km<sup>2</sup>. Por último, también se puede encontrar la estación hidrométrica Huatiapa, cuyo registro histórico servirá para validar los caudales simulados.





FUENTE: Elaboración propia

Figura 41 Ubicación de cuencas modeladas

## 2.5.4 SUELOS

Apoyados en el mapa de suelos oficial del Ministerio de Agricultura del Perú (MINAGRI), se desarrolló la distribución de suelos en la zona de estudio. La mayoría del área de estudio presenta un tipo de suelo en dos de sus variantes leptosol dútrico (56.5%) y leptosol lítico (16.9%). Estos son un tipo de suelos que se encuentran bajo constantes procesos de erosión hídrica y eólica, son suelos poco compactados, con buena o moderada infiltración y bien drenados. Por otro lado, los solonchak háplico que en proporción tienen un 11.4% de ocupación en el área de estudio se desarrollan sobre regiones áridas, donde el material es no consolidado.

En la **Tabla 14** se muestran los principales parámetros según la base de datos del SWAT considerados para la modelación.

**Tabla 14** Características Hidrológicas de los Tipos de Suelos Derivados en Base a la Información Geológica del Área

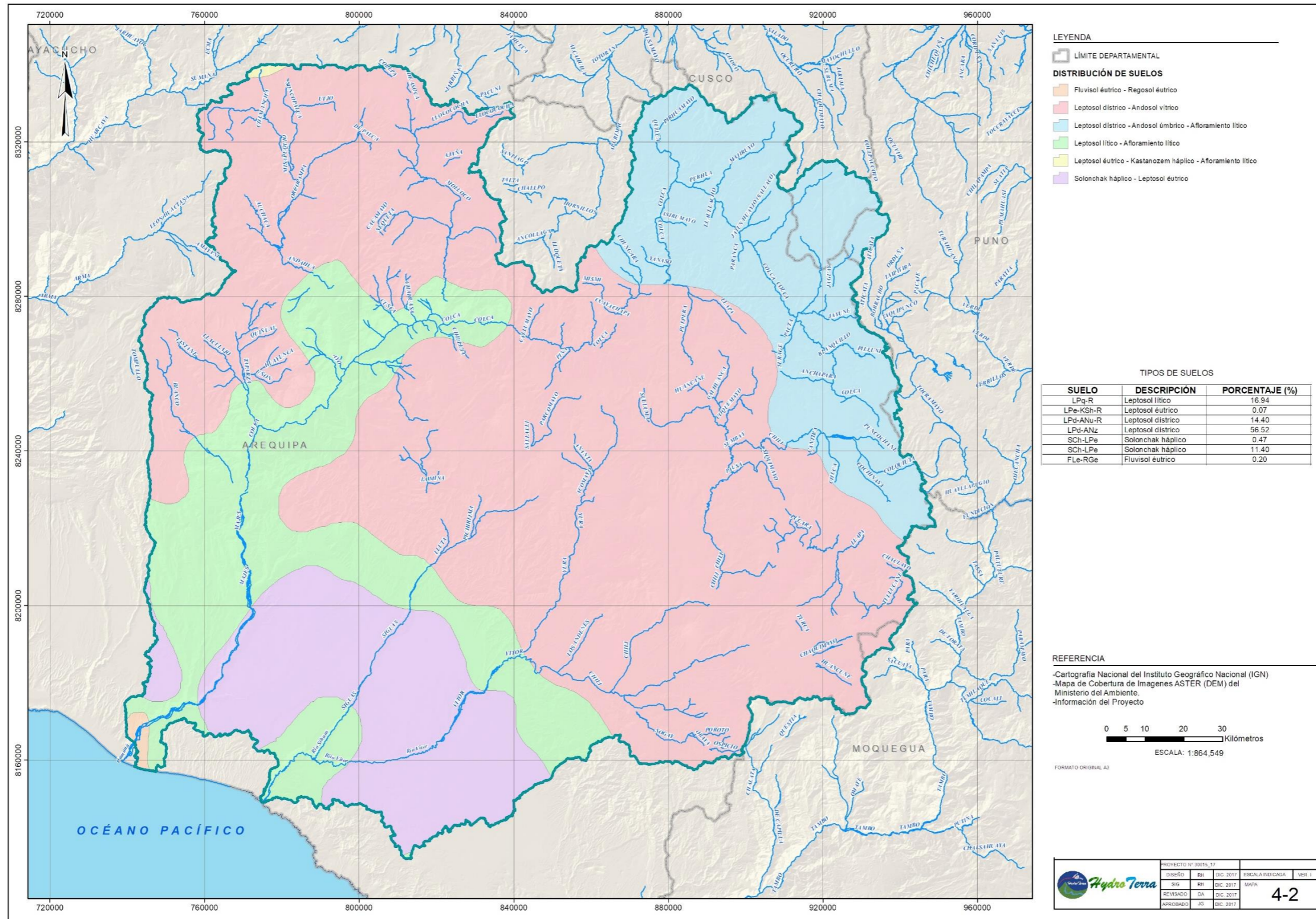
| Tipo de Suelo     | SOL_BD1 | SOL_AWC1 | SOL_K1 | CLAY1 | SILT1 | SAND1 | ROCK1 | SOL_ALB1 | USLE_K1 |
|-------------------|---------|----------|--------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|
| LEPTOSOL LÍTICO   | 1.13    | 0.16     | 43     | 11.5  | 43.23 | 45.27 | 10.48 | 0.01     | 0.28    |
| LEPTOSOL ÉÚTRICO  | 1.27    | 0.17     | 49     | 11.5  | 43.23 | 45.27 | 6.43  | 0.01     | 0.28    |
| LEPTOSOL DÍSTRICO | 1.25    | 0.16     | 44     | 11.5  | 43.23 | 45.27 | 11.74 | 0.01     | 0.28    |
| SOLOCHAK HÁPLICO  | 0.3     | 0.35     | 29     | 10    | 45    | 45    | 0     | 0.01     | 0.1     |
| FLUVISOL ÉÚTRICO  | 1.4     | 0.16     | 19     | 20    | 37.83 | 42.17 | 12.77 | 0.01     | 0.28    |

FUENTE: Elaboración propia

Donde:

- SOL\_BD1:** densidad húmeda del suelo ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
- SOL\_AWC1:** capacidad volumétrica de agua disponible en el suelo ( $\text{mm}/\text{mm}$ )
- SOL\_K1:** conductividad hidráulica saturada ( $\text{mm}/\text{hr}$ )
- CLAY1:** % de arcilla
- SILT1:** % de limo
- SAND1:** % de arena
- ROCK1:** % área ocupada por roca
- SOL\_ALB1:** albedo del suelo
- USLE\_K1:** factor de erosión para la fórmula USLE).

La distribución espacial de estos tipos de suelos puede verse en la **Figura 42**.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 42 Mapa de Distribución de Suelos

### 2.5.5 MAPA DE USO DE SUELO

La zona de estudio hidrológico, al poseer una escala regional (1: 900,000) está compuesta por diversos tipos de coberturas en función a la variación de la altitud. En la parte alta, predomina el Pajonal Altoandino con un 30.5% y Tundra con un 23.7%. En la parte intermedia se puede encontrar en mayor proporción, Matorral Semiárido templado con una proporción de 12.8%. Aguas debajo del área de estudio hidrológico, en mayor proporción se encuentra el desierto semicálido, seguido de pequeñas zonas con lomas, centros poblados y actividad agropecuaria. La distribución espacial de estas coberturas se ilustra en la **Figura 43**, mientras que sus parámetros se pueden ver en la **Tabla 15**.

**Tabla 15 Parámetros de la Vegetación Según el Tipo de Uso de Suelo**

| <i>Uso de Suelo</i>         | <i>BIO_E</i> | <i>HVSTI</i> | <i>BLAI</i> | <i>FRGRW1</i> | <i>LAIMX1</i> | <i>FRGRW2</i> | <i>LAIMX2</i> | <i>DLAI</i> | <i>CHTMX</i> | <i>RDMX</i> | <i>T_OPT</i> | <i>T_BASE</i> |
|-----------------------------|--------------|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| Pajonal altoandino          | 34           | 0.9          | 2.5         | 0.05          | 0.1           | 0.25          | 0.7           | 0.35        | 1            | 2           | 25           | 12            |
| Tundra                      | 34           | 0.9          | 2           | 0.05          | 0.1           | 0.25          | 0.7           | 0.35        | 1            | 2           | 25           | 12            |
| Nival                       | 0            | 0            | 0           | 0             | 0             | 0             | 0             | 0           | 0            | 0           | 0            | 0             |
| Matorral semiarido templado | 35           | 0.9          | 4           | 0.05          | 0.05          | 0.49          | 0.95          | 0.99        | 0.5          | 2           | 25           | 12            |
| Desierto templado           | 0.01         | 0.01         | 0.01        | 0.05          | 0.05          | 0.49          | 0.95          | 0.99        | 0.01         | 0.1         | 25           | 12            |
| Centros poblados            | 0.01         | 0.01         | 0.01        | 0.05          | 0.05          | 0.49          | 0.95          | 0.99        | 0.01         | 0.1         | 25           | 12            |
| Actividad Agropecuaria      | 33.5         | 0.45         | 3           | 0.15          | 0.05          | 0.5           | 0.95          | 0.64        | 1            | 2           | 30           | 11            |

*FUENTE: Elaboración propia*

Donde:

**(BIO\_E):** tasa biomasa/energía o eficiencia del uso de la radiación ((kg/ha) / (MJ/m<sup>2</sup>))

**HVSTI:** Índice de cosecha o extracción ((kg/ha) / (kg/ha))

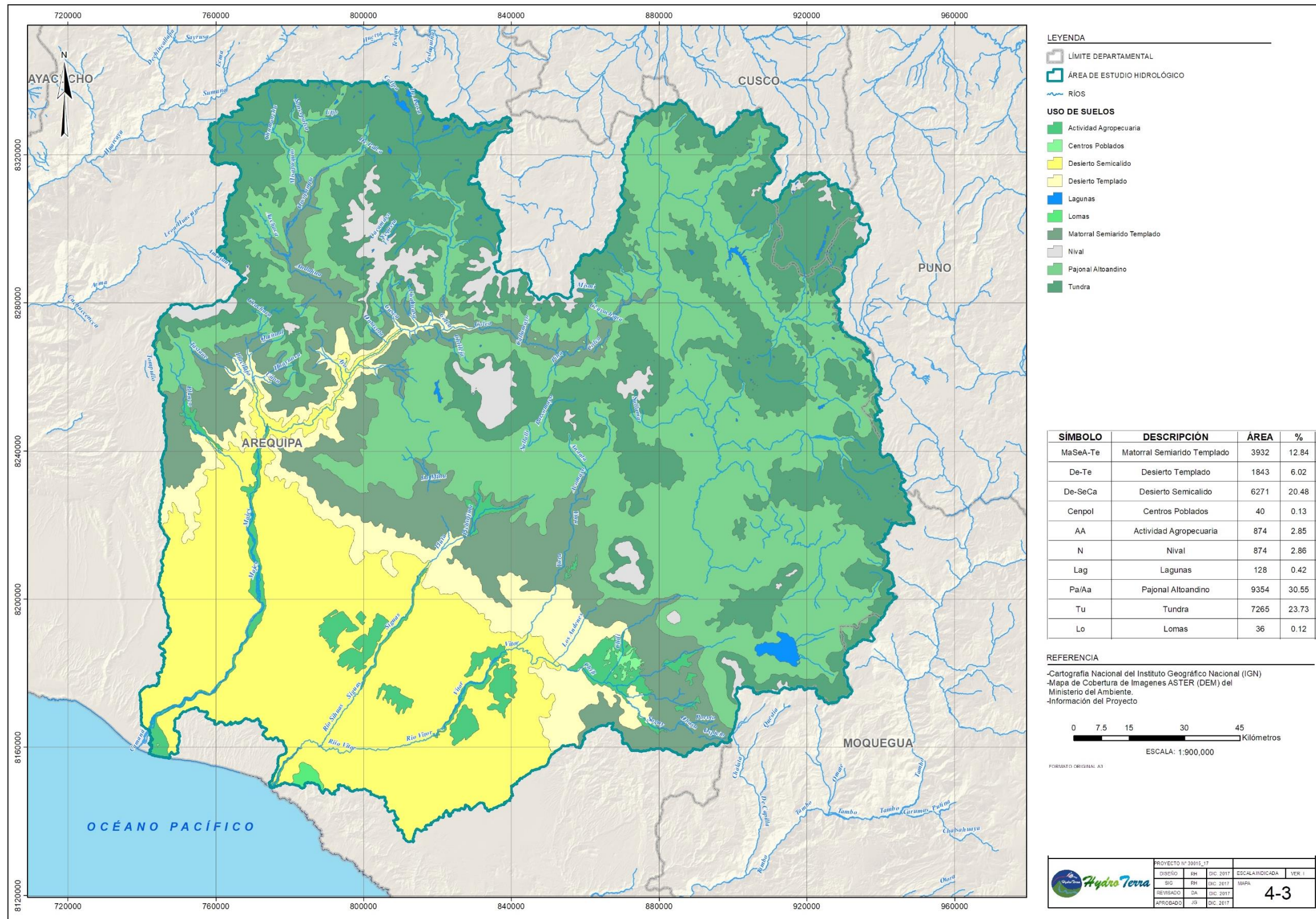
**BLAI:** Índice de área foliar máxima potencial

**FRGRW1:** Fracción del BLAI correspondiente en el primer punto de desarrollo del área foliar optima en la curva de desarrollo

**LAIMX1:** Porcentaje de la época de crecimiento que corresponde al punto FRGRW1

**FRGRW2:** Fracción del BLAI correspondiente al segundo punto de desarrollo del área foliar optima en la curva de desarrollo

- LAIMX2:** Porcentaje de la época de crecimiento que corresponde al punto FRGRW2
- DLAI:** Fracción de la cobertura o de la época de crecimiento de la vegetación cuando las hojas empiezan a secarse
- CHTMX:** Altura máxima del dosel (m)
- RDMX:** Profundidad radicular máxima (m)
- T\_OPT:** Temperatura óptima de crecimiento (°C)
- T\_BASE:** Temperatura mínima de crecimiento (°C).



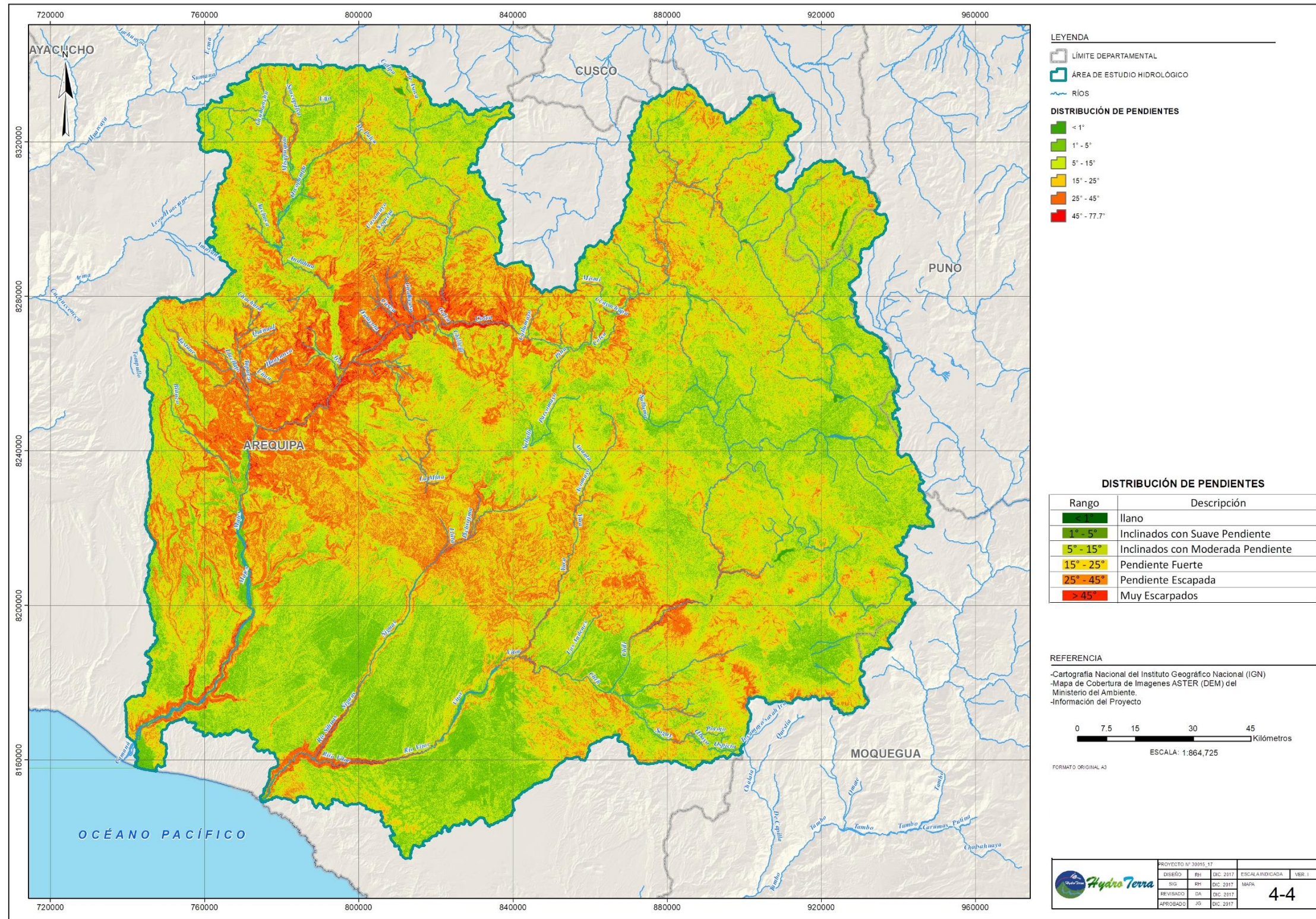
FUENTE: Elaboración propia

Figura 43 Mapa de Distribución de los Usos de Suelo

### 2.5.6 MAPA DE PENDIENTES

Debido a la importancia de la pendiente, como un parámetro que afecta significativamente la tasa de producción de escorrentía y recarga, donde para una pendiente plana tendremos una recarga mayor que en las zonas con alta pendiente, se realizó una clasificación de las pendientes predominantes en la zona de estudio hidrológico.

En general, la zona de estudio tiene predominancia de pendientes moderadas ( $5^\circ$  a  $15^\circ$  sexagesimales). Las pendientes más escarpadas ( $25^\circ$ - $45^\circ$ ) y pendientes fuertes ( $15^\circ$ - $25^\circ$ ) se localizan en el tramo del río Majes en la cuenca Camaná y en general en los tramos de los ríos que se encuentran cercanos al litoral. A continuación, en la **Figura 44** se muestra la distribución espacial de las pendientes en la zona de estudio.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 44 Mapa de distribución de Pendientes



## 2.6 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

### 2.6.1 VALIDACIÓN DE LOS CAUDALES SIMULADOS

Para validar los caudales simulados por el modelo SWAT, se cuenta con el registro de la estación hidrométrica Huatiapa. La **Tabla 16** muestra las coordenadas de dicha estación y su ubicación espacial se encuentra en la **Figura 41**.

**Tabla 16** Ubicación de Estación Hidrométrica Utilizada para la Validación

| <i>Estación</i>     | <i>Este</i> | <i>Norte</i> | <i>Elevación</i> |
|---------------------|-------------|--------------|------------------|
| <i>hidrométrica</i> | <i>(m)</i>  | <i>(m)</i>   | <i>(msnm)</i>    |
| Huatiapa            | 771323.0    | 8232002.4    | 699              |

*FUENTE: Elaboración propia*

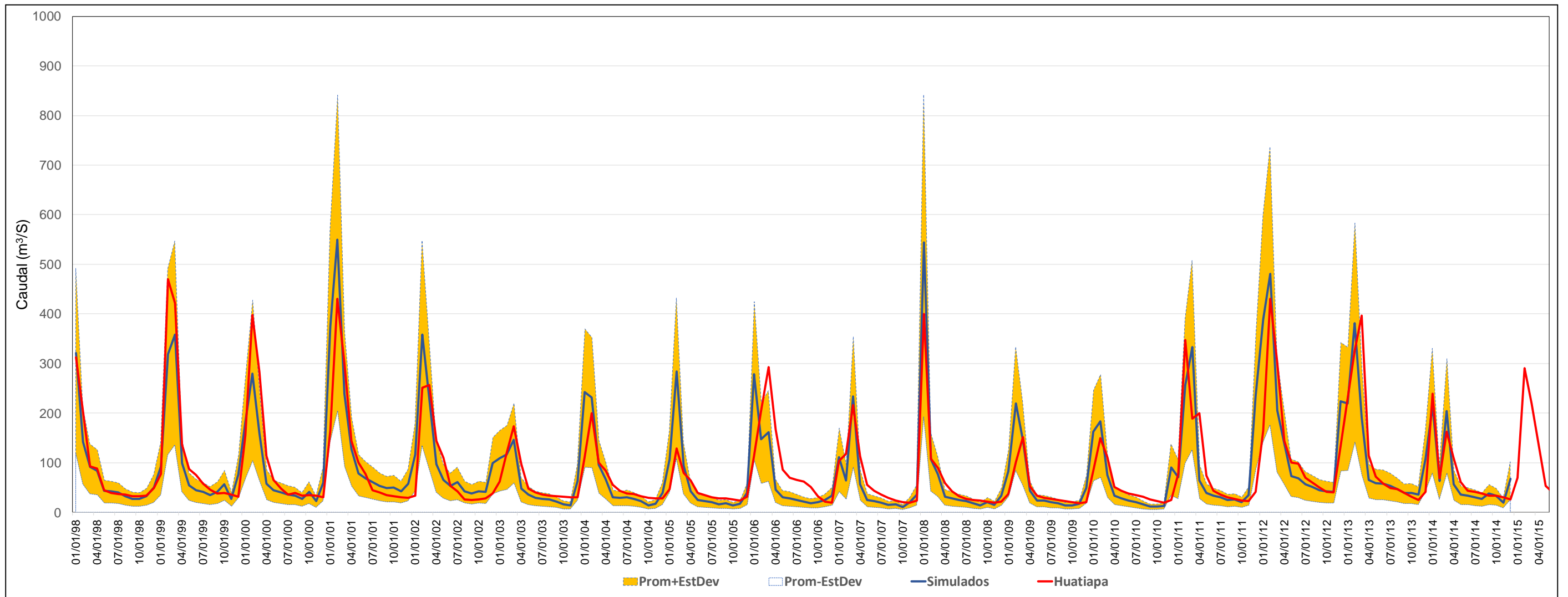
La **Tabla 17** muestra el registro histórico (enero de 1998 a diciembre del 2014) de la estación hidrométrica Huatiapa. Esta será comparada con los caudales simulados por el modelo.

**Tabla 17** Caudales Históricos de la Estación Hidrométrica Huatiapa

| <i>año</i> | <i>Ene</i> | <i>Feb</i> | <i>Mar</i> | <i>Abr</i> | <i>May</i> | <i>Jun</i> | <i>Jul</i> | <i>Ago</i> | <i>Set</i> | <i>Oct</i> | <i>Nov</i> | <i>Dic</i> |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1998       | 311.8      | 202.6      | 92.5       | 87.7       | 44.0       | 38.6       | 36.9       | 36.0       | 32.6       | 32.4       | 33.5       | 48.5       |
| 1999       | 76.9       | 469.4      | 421.5      | 135.9      | 87.1       | 74.9       | 57.6       | 45.1       | 37.5       | 38.6       | 35.5       | 31.0       |
| 2000       | 154.8      | 397.5      | 282.5      | 113.1      | 65.2       | 47.1       | 35.6       | 38.7       | 33.6       | 33.9       | 33.7       | 29.5       |
| 2001       | 164.9      | 430.3      | 301.2      | 144.2      | 100.4      | 77.4       | 43.9       | 39.8       | 34.2       | 32.0       | 29.7       | 28.6       |
| 2002       | 33.5       | 250.8      | 256.9      | 143.7      | 110.1      | 53.0       | 41.8       | 25.4       | 24.2       | 25.7       | 28.2       | 37.6       |
| 2003       | 62.0       | 119.9      | 173.1      | 96.8       | 47.1       | 39.5       | 35.9       | 33.8       | 32.5       | 30.9       | 29.7       | 30.4       |
| 2004       | 111.5      | 200.1      | 99.6       | 83.3       | 55.6       | 43.7       | 37.3       | 36.1       | 32.4       | 29.2       | 27.6       | 28.0       |
| 2005       | 46.4       | 129.0      | 79.7       | 63.4       | 38.3       | 33.9       | 30.2       | 28.1       | 27.5       | 26.0       | 23.4       | 30.8       |
| 2006       | 113.4      | 204.2      | 293.0      | 167.2      | 86.1       | 69.2       | 65.2       | 62.0       | 50.5       | 32.5       | 21.8       | 19.3       |
| 2007       | 103.7      | 117.5      | 215.8      | 113.1      | 54.7       | 43.7       | 35.4       | 29.3       | 23.4       | 19.8       | 19.6       | 23.8       |
| 2008       | 123.4      | 108.0      | 89.2       | 58.1       | 41.6       | 32.4       | 27.0       | 24.7       | 23.5       | 21.2       | 19.6       | 21.8       |
| 2009       | 36.7       | 101.6      | 152.0      | 52.3       | 33.0       | 28.8       | 26.6       | 24.7       | 22.4       | 20.3       | 18.2       | 20.4       |
| 2010       | 84.1       | 149.6      | 110.7      | 50.3       | 43.1       | 38.0       | 34.5       | 30.6       | 25.4       | 22.8       | 19.3       | 25.0       |
| 2011       | 77.2       | 347.7      | 189.2      | 200.1      | 74.1       | 43.6       | 35.1       | 30.4       | 26.9       | 23.2       | 22.3       | 40.7       |
| 2012       | 234.2      | 628.1      | 426.6      | 453.3      | 164.8      | 98.0       | 69.1       | 60.0       | 49.8       | 41.0       | 40.1       | 132.5      |
| 2013       | 228.8      | 324.9      | 396.7      | 114.3      | 71.6       | 57.9       | 48.5       | 45.9       | 39.2       | 31.0       | 24.7       | 40.5       |
| 2014       | 239.1      | 68.7       | 162.8      | 108.9      | 60.5       | 43.5       | 40.7       | 37.4       | 33.8       | 33.5       | 29.8       | 25.3       |

*FUENTE: Elaboración propia*

Luego, se extrajeron los caudales simulados con el modelo SWAT de la cuenca cuya desembocadura coincide con la ubicación de la estación Huatiapa. La comparación de estos dos registros se muestra en la **Figura 45** y la ubicación de la cuenca de la cual se extrajeron los caudales simulados se muestra en la **Figura 41**



**Figura 45 Caudales Simulados por el Modelo Hidrológico SWAT vs Caudales Observados en la Estación Huatiapa (ene 1998 – dic 2014)**

La **Figura 45** nos permite ver que el resultado de la simulación hidrológica con el modelo SWAT conversa con las observaciones de campo disponibles en la estación Huatiapa.

La línea azul (caudales simulados) se encuentra dentro de una franja amarilla (intervalo de incertidumbre), que engloba las variaciones de los caudales a lo largo de las horas, además de otorgarle a los resultados simulados un grado de confianza estadístico. La zona de incertidumbre cubre el 70% de los valores observados. La incertidumbre la elevan los valores extraños observados en el 2006 y 2013 en donde se observan picos en meses inusuales.

En general, tanto la tendencia estacional, como los valores para las diversas fechas simuladas coinciden de manera gráfica. La franja de incertidumbre nos indica que, en casos extremos, por ejemplo, años 2001 y 2008, el valor del pico podría alcanzar más de los 800 m<sup>3</sup>/s, aunque el pico observado de esos años estaría apenas sobre los 500 m<sup>3</sup>/s. Un valor indicativo del pico promedio se puede establecer alrededor de los 300 m<sup>3</sup>/s como promedio de largo plazo. El pico más bajo se observó en el 2003 alrededor de los 180 m<sup>3</sup>/s. Los flujos bases, entre los meses de mayo, junio, julio y agosto, el caudal está alrededor de 20 m<sup>3</sup>/s.

Para dar consistencia a los resultados simulados, se calculó diversos indicadores estadísticos que evalúan la coincidencia entre los valores simulados y observados, y estos se muestran en la **Tabla 18**. De ella, se puede ver que en general los indicadores presentan valores muy buenos según valores de performance para estimar la simulación de un modelo en Moriasi, D, 2002. Entonces como conclusión, se puede decir que los caudales simulados por el modelo representan la realidad, de ello se infiere que el modelo está calibrado para las diversas zonas analizadas alrededor del área de estudio hidrológico.

**Tabla 18** Indicadores de la Bondad de Ajuste para la Simulación Hidrológica con el Modelo SWAT en la Estación Hidrométrica Huatiapa

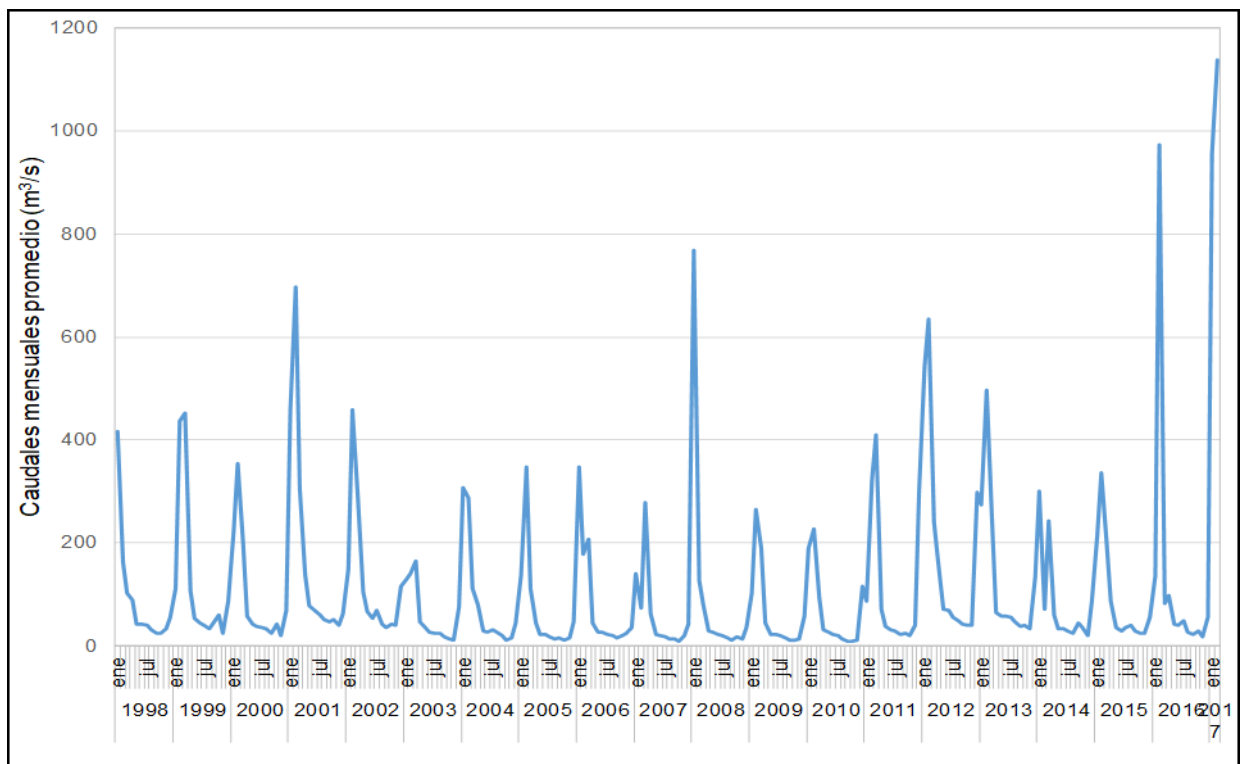
| <i>Índices</i> | <i>Valores</i> |
|----------------|----------------|
| r              | 0.85           |
| R <sup>2</sup> | 0.72           |
| D              | 0.92           |
| NSE            | 0.67           |
|                | Bueno          |
| RSR            | 0.57           |
|                | Muy bueno      |

|       |                                     |
|-------|-------------------------------------|
| PBIAS | -1.3                                |
|       | Bueno                               |
| R     | (Coeficiente de correlación),       |
| R2    | (Coeficiente de determinación),     |
| D     | (índice de concordancia),           |
| NSE   | (Eficiencia de Nash-Sutcliffe,      |
| RSR   | (Relación de desviación estándar) y |
| PBIAS | (Porcentaje de Bias)                |

FUENTE: Elaboración propia

## 2.6.2 CAUDALES PROMEDIO MENSUALES EN LA CUENCA CAMANÁ

La muestra el hidrograma mensual promedio de la simulación hidrológica con el modelo SWAT de la cuenca Camaná desde enero de 1998 hasta marzo del 2017. El caudal promedio mensual más alto se dio en marzo del 2016 con un pico de 973 m<sup>3</sup>/s y en marzo del 2017 con 1138 m<sup>3</sup>/s. En general, el patrón entre meses húmedos y secos se repite a lo largo de la simulación histórica; el caudal en meses húmedos fluctúa entre 350 a 420 m<sup>3</sup>/s, y en meses secos entre 25 a 40 m<sup>3</sup>/s (**Figura 46**).

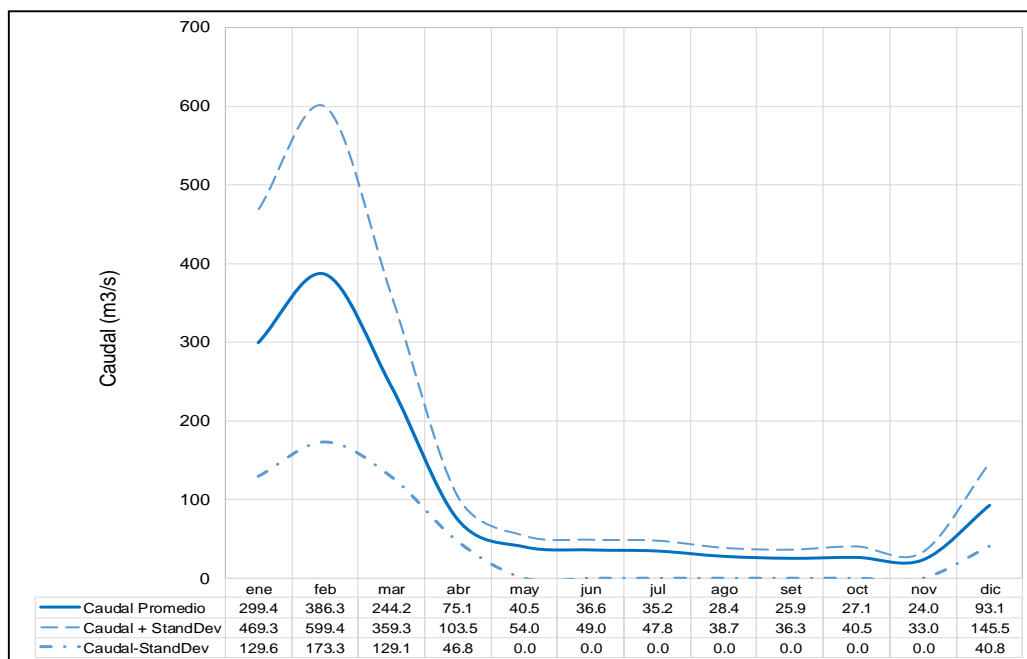


FUENTE: Elaboración propia

**Figura 46** Caudal Promedio Mensual (m<sup>3</sup>/s) en la Cuenca Camaná (1998 – 2017)

El caudal promedio multianual se muestra en la **Figura 47**. El caudal pico anual se obtiene a finales de febrero y principios de marzo con aproximadamente 599 m<sup>3</sup>/s con una

desviación estándar de +/- 210 m<sup>3</sup>/s. La variación más alta se observa en los meses húmedos de enero a marzo debido a las fluctuaciones de los caudales picos, demostrado por una desviación estándar alta. El caudal más bajo se obtiene en los meses de mayo a agosto con caudales promedio entre 35 a 40 m<sup>3</sup>/s. Es a partir de diciembre, donde se observa el incremento de los caudales.



FUENTE: Elaboración propia

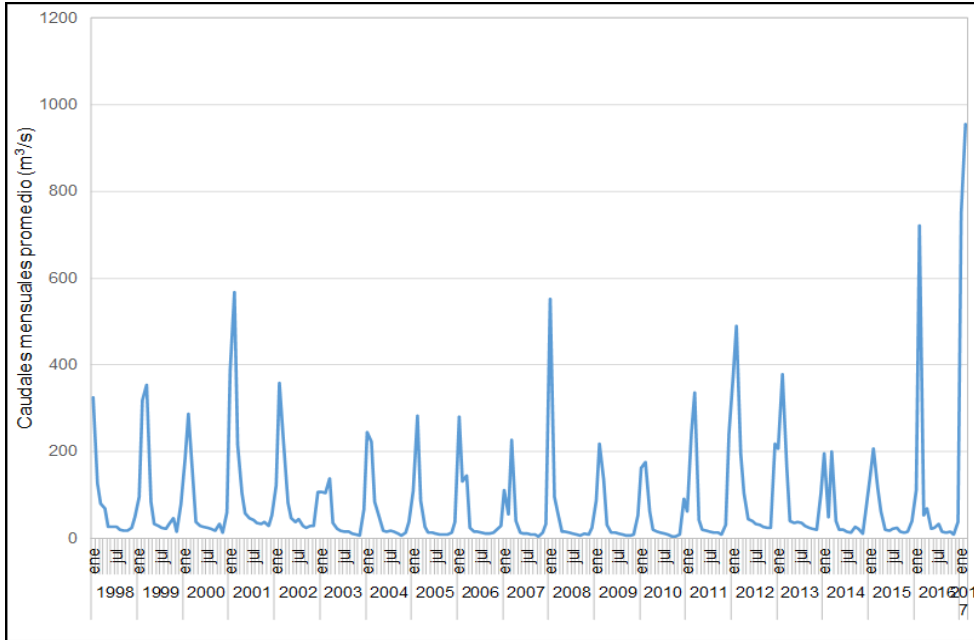
**Figura 47 Caudal Promedio Mensual (m<sup>3</sup>/s) Multianual en la Cuenca Camaná (1998–2017)**

### 2.6.3 CAUDALES PROMEDIO MENSUALES EN LA CUENCA QUILCA-VITOR-CHILI

La **Figura 48** muestra el hidrograma mensual promedio de la simulación hidrológica con el modelo SWAT de la cuenca Quilca-Vitor-Chili desde enero de 1998 hasta marzo del 2017. El caudal promedio mensual más alto se dio en marzo del 2016 con un pico de 721 m<sup>3</sup>/s y en marzo del 2017 con 751 m<sup>3</sup>/s. En general, el patrón entre meses húmedos y secos se repite a lo largo de la simulación histórica; el caudal en meses húmedos fluctúa entre 280 a 400 m<sup>3</sup>/s, y en meses secos entre 10 a 30 m<sup>3</sup>/s.

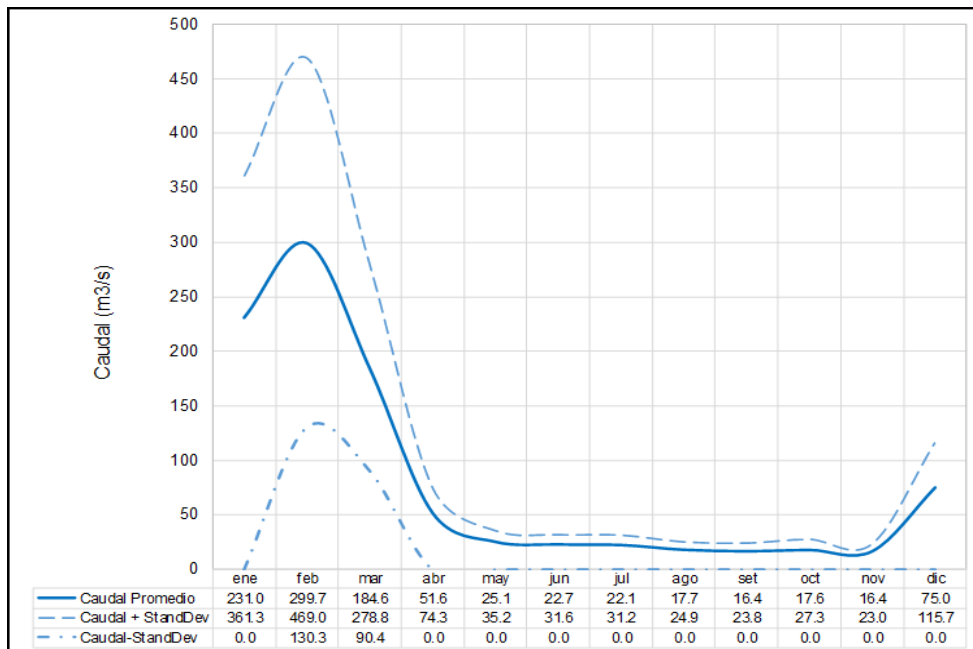
El caudal promedio multianual se muestra en la **Figura 49**. El caudal pico anual se obtiene a finales de febrero y principios de marzo con aproximadamente 469 m<sup>3</sup>/s con una desviación estándar de +/- 169 m<sup>3</sup>/s. La variación más alta se observa en los meses húmedos de enero a marzo debido a las fluctuaciones de los caudales picos, demostrado por una

desviación estándar alta. El caudal más bajo se obtiene en los meses de mayo a agosto con caudales promedio entre 20 a 35 m<sup>3</sup>/s. Es a partir de diciembre, donde se observa el incremento de los caudales.



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 48** Caudal Promedio Mensual (m<sup>3</sup>/s) en la Cuenca Quilca-Vitor-Chili (1998 – 2017)



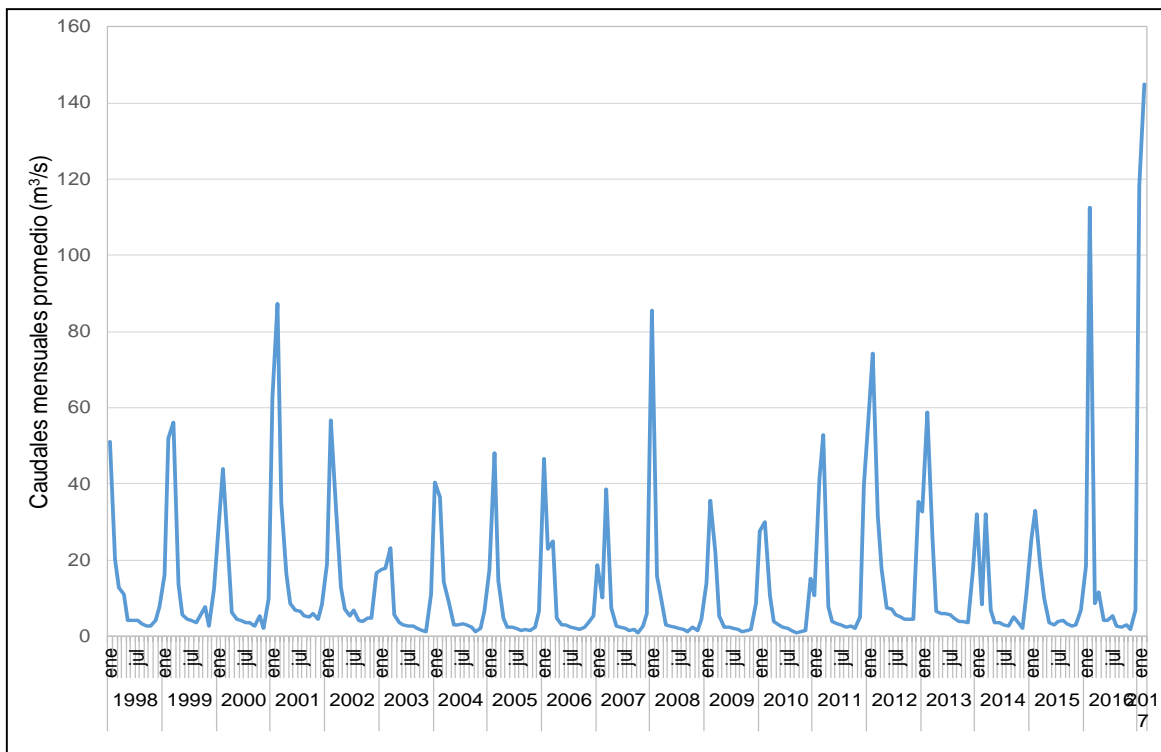
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 49** Caudal Promedio Mensual (m<sup>3</sup>/s) Multianual en la Cuenca Quilca-Vitor-Chili (1998–2017)

#### 2.6.4 CAUDALES PROMEDIO MENSUALES EN LA CUENCA SIGUAS

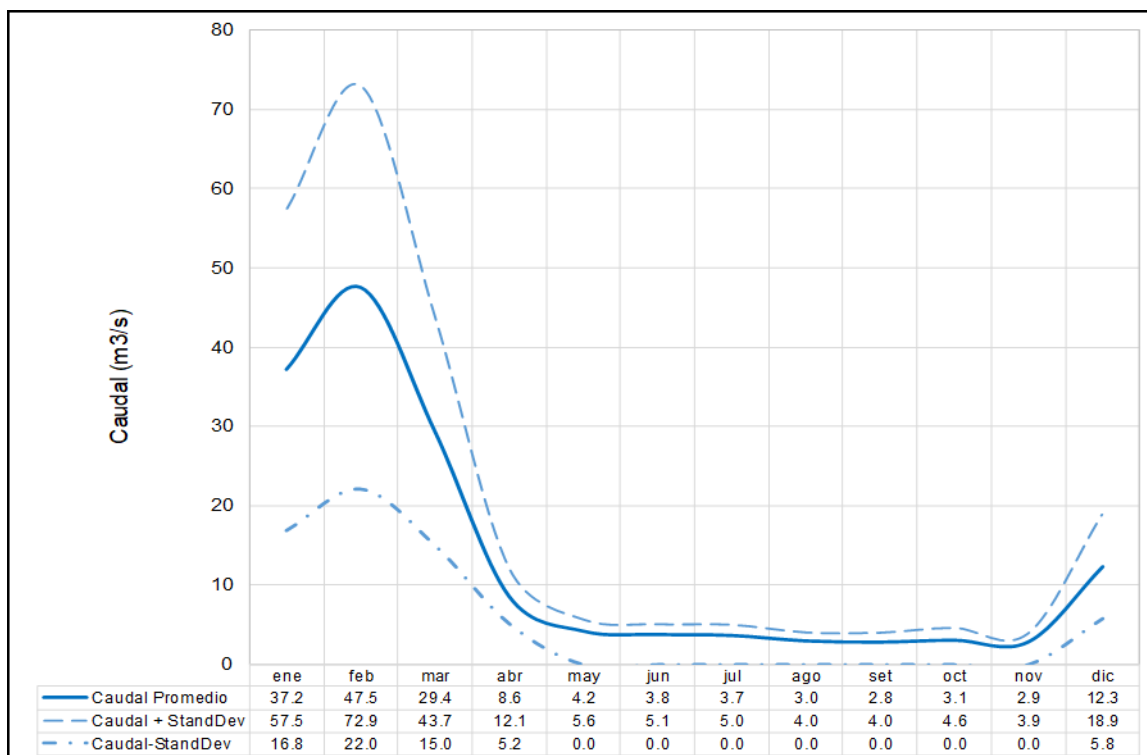
La **Figura 50** muestra el hidrograma mensual promedio de la simulación hidrológica con el modelo SWAT de la cuenca Siguas desde enero de 1998 hasta marzo del 2017. El caudal promedio mensual más alto se dio en marzo del 2016 con un pico de  $112.6 \text{ m}^3/\text{s}$  y en marzo del 2017 con  $145 \text{ m}^3/\text{s}$ . En general, el patrón entre meses húmedos y secos se repite a lo largo de la simulación histórica; el caudal en meses húmedos fluctúa entre  $30$  a  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ , y en meses secos entre  $0$  a  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

El caudal promedio multianual se muestra en la **Figura 51**. El caudal pico anual se obtiene a finales de febrero y principios de marzo con aproximadamente  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  con una desviación estándar de  $\pm 25 \text{ m}^3/\text{s}$ . La variación más alta se observa en los meses húmedos de enero a marzo debido a las fluctuaciones de los caudales picos, demostrado por una desviación estándar alta. El caudal más bajo se obtiene en los meses de mayo a agosto con caudales promedio de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Es a partir de diciembre, donde se observa el incremento de los caudales.



**Figura 50** Caudal Promedio Mensual ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) en la Cuenca Siguas (1998 – 2017)





FUENTE: Elaboración propia

**Figura 51 Caudal Promedio Mensual ( $m^3/s$ ) Multianual en la Cuenca Sigas (1998–2017)**

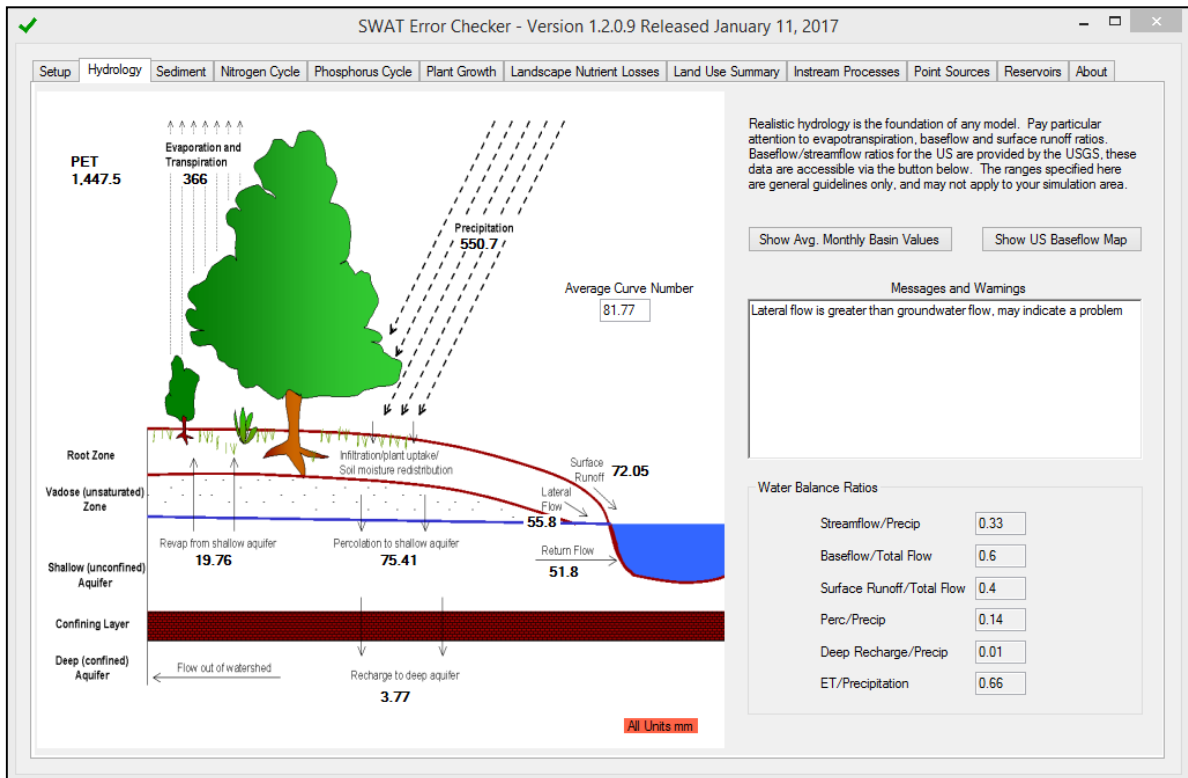
## 2.7 BALANCES HÍDRICO

### 2.7.1 BALANCE HÍDRICO DE LA ZONA DE ESTUDIO HIDROLÓGICO

La **Figura 52** muestra el balance hídrico promedio anual de la zona de estudio hidrológico que involucra tanto las cuencas regionales Camaná como la Quilca-Vitor-Chili (en el periodo de registro de enero 1998 hasta el marzo del 2017).

Según este balance obtenido como output del modelo hidrológico SWAT, la precipitación promedio de la zona de estudio hidrológico es de 550.7 mm/año. La escorrentía **superficial total** está compuesta por la suma de las siguientes componentes: escorrentía superficial (72.05 mm/año), flujos laterales o escorrentía subsuperficial (55.8 mm/año) y flujo de retorno de las aguas subterráneas (51.8 mm/año); estas últimas reingresan al sistema como escorrentía al no poder llegar a los acuíferos profundos a causa de la presencia de leptosoles de poca compactación en los estratos más superficiales, y con capas más compactas en profundidad. La sumatoria de las componentes presentadas forman la escorrentía total, la cual representa el 33% de la precipitación.

La percolación (75.41 mm/año) representa el 15% con respecto a la precipitación, producto de los ya mencionados estratos poco compactados en las capas superficiales que favorecen a la infiltración entre los poros. De esta componente, el volumen de agua que llega a los estratos más profundos y se transforma en recarga a los acuíferos profundos es 3.77 mm/año, y que representa el 5% de aporte con respecto a la percolación.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 52 Balance Hídrico General del Área de Estudio

Tabla 19 Resumen del Balance Hídrico en la Zona de Análisis Hidrológico

| Parámetros                        | Total  |
|-----------------------------------|--------|
| Precipitación (mm)                | 550.70 |
| Evapotranspiración (mm)           | 366.00 |
| Escorrentía total (mm)*           | 179.70 |
| Escorrentía superficial (mm)      | 72.05  |
| Escorrentía subsuperficial (mm)   | 55.80  |
| Flujo de retorno subterráneo (mm) | 51.80  |
| Percolación (mm)                  | 75.41  |
| Recarga (mm)                      | 3.77   |
| Almacenamiento (mm)               | 19.76  |

FUENTE: Elaboración propia

La **Tabla 20** muestra el balance general mensual detallado de la zona de estudio hidrológico, que posee una extensión de 30617 km<sup>2</sup>. Se puede notar que la percolación, y por consiguiente la recarga que es un porcentaje de esta componente, son nulas durante los meses secos. El mayor aporte se da durante los meses húmedos con 25 mm/mes en promedio. La escorrentía se mantiene durante el año debido al flujo base que aporte de forma continua a la escorrentía total. Y el almacenamiento es positivo en el balance anual (46.7 mm/año) ya que los meses húmedos proveen de suficiente cantidad de agua para suplir la deficiencia en meses secos.

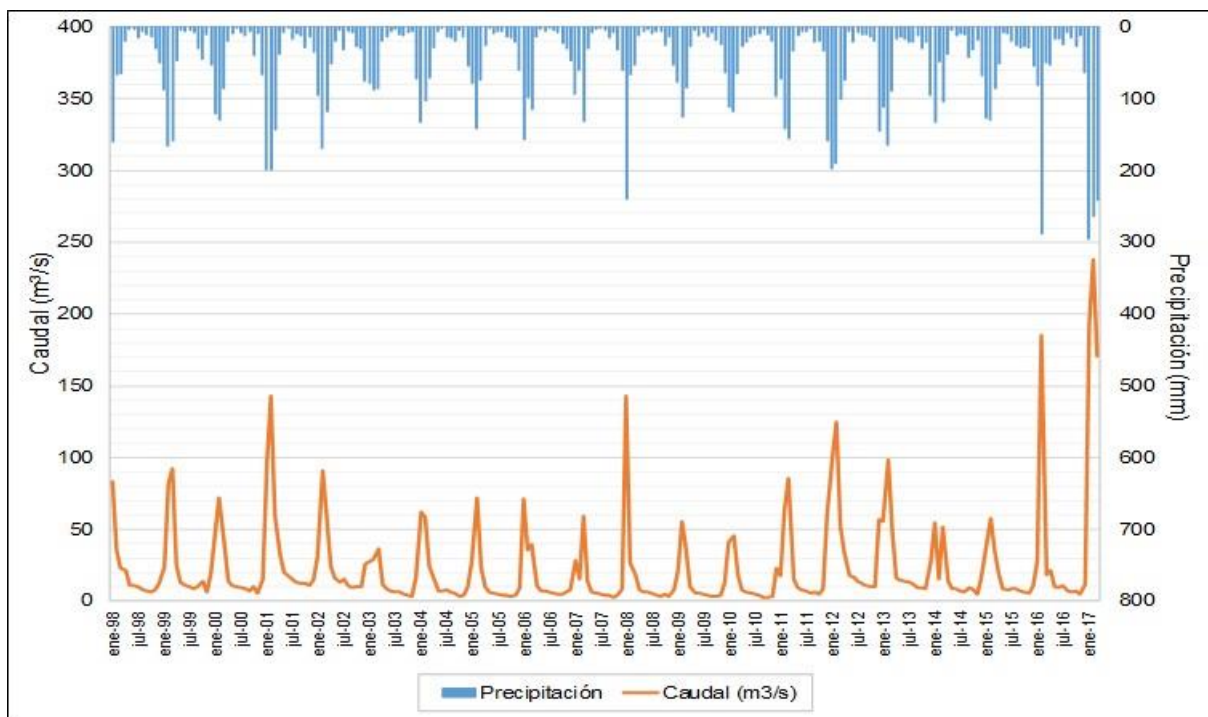
**Tabla 20 Balance Hídrico Promedio Mensual Multianual en la Zona de Estudio (mm)**

| Cuenca de estudio               | <i>Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Almacenamiento</i> |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |              |
|---------------------------------|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
|                                 | <i>ene</i>   | <i>feb</i> | <i>mar</i> | <i>abr</i> | <i>may</i> | <i>jun</i> | <i>jul</i> | <i>ago</i> | <i>sep</i> | <i>oct</i> | <i>nov</i> | <i>díc</i> | <i>Total</i> |
| Precipitación (mm)              | 132.2  | 137.5      | 103.6      | 32.4       | 8.7        | 7.9        | 11.2       | 9.7        | 14.5       | 21.5       | 20.2       | 72.0       | 571.5        |
| Evapotranspiración (mm)         | 54.4   | 53.1       | 56.3       | 35.0       | 15.8       | 12.7       | 14.7       | 13.8       | 16.8       | 23.4       | 22.7       | 41.1       | 359.9        |
| Escorrentía superficial (mm)    | 28.2   | 31.7       | 19.1       | 2.1        | 0.1        | 0.0        | 0.3        | 0.1        | 0.2        | 0.3        | 0.4        | 7.0        | 89.4         |
| Escorrentía subsuperficial (mm) | 16.2   | 18.7       | 13.4       | 3.1        | 0.3        | 0.2        | 0.4        | 0.3        | 0.5        | 1.2        | 1.0        | 5.8        | 61.2         |
| Percolación (mm)                | 22.2   | 27.1       | 17.1       | 2.3        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 3.0        | 71.8         |
| Recarga (mm)                    | 1.1  | 1.4        | 0.9        | 0.1        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.2        | 3.6          |
| Almacenamiento (mm)             | 26.3   | 24.3       | 10.2       | -7.2       | -7.2       | -4.8       | -3.8       | -4.2       | -2.5       | -2.2       | -2.9       | 20.7       | 46.7         |

*FUENTE: Elaboración propia*

En la **Figura 53** se muestra la relación precipitación – escorrentía del área de estudio hidrológico, en esta figura se puede notar una relación directa a causa de eventos de precipitación, lo cual conlleva a pulsos inmediatos luego de estos eventos.

Los picos históricos a nivel mensual, ya evaluados en capítulos anteriores demuestran que el componente del balance hídrico (escorrentía superficial) sigue siendo uno de los mayores aportantes a la escorrentía total del sistema.



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 53 Relación Precipitación Escorrentía a Nivel Mensual en la Zona de Estudio (ene 1998 – mar 2017)**

### 2.7.2 BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA CAMANÁ

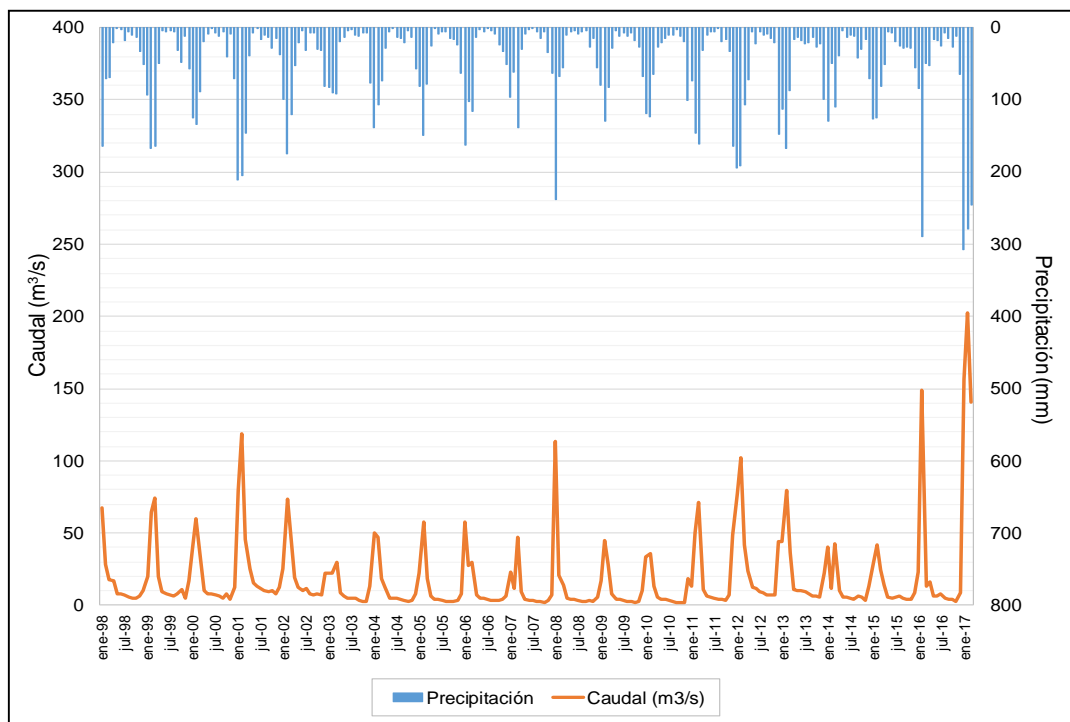
La **Tabla 21**, muestra el balance hídrico mensual detallado de la cuenca Camaná, de una extensión de 17460 km<sup>2</sup>. Se nota la misma tendencia que en el área de estudio hidrológico, la percolación, y por consiguiente la recarga que es un porcentaje de esta componente, son nulas durante los meses secos. El mayor aporte se da durante los meses húmedos con 22 mm/mes en promedio. La escorrentía se mantiene durante el año debido al flujo base que aporte de forma continua a la escorrentía total. Y el almacenamiento es positivo en el balance anual (78.5 mm/año) ya que los meses húmedos proveen de suficiente cantidad de agua para suplir la deficiencia en meses secos. Este almacenamiento es mayor que el correspondiente al área de estudio hidrológico (46.7 mm /año)

**Tabla 21 Balance Hídrico Promedio Mensual Multianual en la Cuenca Camaná (mm)**

| Cuenca de estudio               | Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Almacenamiento |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|---------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                                 | ene   | feb  | mar  | abr  | may  | jun  | jul  | ago  | sep  | oct  | nov  | dic  | Total |
| Precipitación (mm)              | 135.  | 140. | 105. | 33.0 | 8.6  | 8.0  | 11.3 | 9.9  | 14.8 | 21.9 | 21.1 | 74.8 | 585.0 |
| Evapotranspiración (mm)         | 53.4  | 51.4 | 55.1 | 35.1 | 16.2 | 13.2 | 15.3 | 14.4 | 17.4 | 23.9 | 23.8 | 41.5 | 360.9 |
| Escorrentía superficial (mm)    | 22.8  | 25.7 | 14.6 | 1.2  | 0.0  | 0.0  | 0.1  | 0.0  | 0.1  | 0.1  | 0.2  | 5.0  | 69.9  |
| Escorrentía subsuperficial (mm) | 20.8  | 24.2 | 17.3 | 4.0  | 0.4  | 0.3  | 0.5  | 0.4  | 0.6  | 1.4  | 1.3  | 7.3  | 78.5  |
| Percolación (mm)                | 29.8  | 35.4 | 22.2 | 3.1  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 4.2  | 94.7  |
| Recarga (mm)                    | 1.5   | 1.8  | 1.1  | 0.2  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.2  | 4.7   |
| Almacenamiento (mm)             | 27.8  | 26.2 | 12.8 | -6.6 | -7.6 | -5.2 | -4.1 | -4.5 | -2.8 | -2.2 | -2.9 | 23.9 | 54.9  |

FUENTE: Elaboración propia

En la **Figura 54** se muestra la relación precipitación – escorrentía de la cuenca Camaná, en esta figura se puede notar una relación directa a causa de eventos de precipitación, lo cual conlleva a pulsos inmediatos luego de estos eventos.



**Figura 54 Relación Precipitación Escorrentía a Nivel Mensual en la Cuenca Camaná (ene 1998 – mar 2017)**

### 2.7.3 BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA QUILCA-VITOR-CHILI

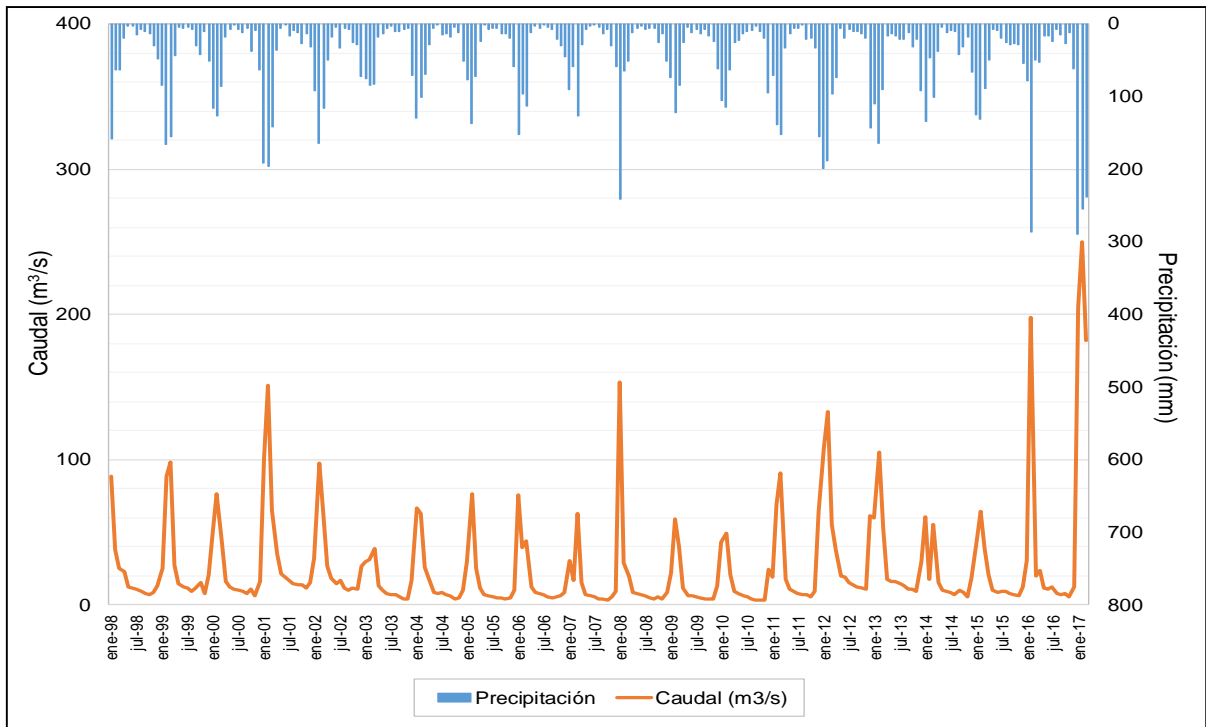
La **Tabla 22** muestra el balance hídrico mensual detallado de la cuenca Quilca-Vitor-Chili, de una extensión de 13157 km<sup>2</sup>. Se nota la misma tendencia que en el área de estudio hidrológico, la percolación, y por consiguiente la recarga que es un porcentaje de esta componente, son nulas durante los meses secos. El mayor aporte se da durante los meses húmedos con 21 mm/mes en promedio. La escorrentía se mantiene durante el año debido al flujo base que aporte de forma continua a la escorrentía total. Y el almacenamiento es positivo en el balance anual (35.6 mm/año) ya que los meses húmedos proveen de suficiente cantidad de agua para suplir la deficiencia en meses secos. Este almacenamiento es menor que los reportados en el área de estudio y la cuenca Camaná, por tanto, es la cuenca que poseería un menor aporte hídrico a los acuíferos.

**Tabla 22 Balance Hídrico Promedio Mensual Multianual en la Cuenca Quilca-Vitor-Chili (mm)**

| <i>Cuenca de estudio</i>        | <i>Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Almacenamiento</i> |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |              |
|---------------------------------|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
|                                 | <i>ene</i>   | <i>feb</i> | <i>mar</i> | <i>abr</i> | <i>may</i> | <i>jun</i> | <i>jul</i> | <i>ago</i> | <i>sep</i> | <i>oct</i> | <i>nov</i> | <i>dic</i> | <i>Total</i> |
| Precipitación (mm)              | 127.9  | 133.5      | 100.6      | 31.5       | 8.7        | 7.8        | 11.1       | 9.4        | 14.1       | 21.1       | 19.0       | 68.1       | 552.8        |
| Evapotranspiración (mm)         | 55.7   | 55.5       | 58.0       | 34.9       | 15.3       | 12.1       | 13.9       | 13.0       | 16.0       | 22.6       | 21.1       | 40.5       | 358.6        |
| Escorrentía superficial (mm)    | 35.5   | 39.8       | 25.5       | 3.3        | 0.1        | 0.1        | 0.5        | 0.2        | 0.3        | 0.6        | 0.7        | 9.8        | 116.3        |
| Escorrentía subsuperficial (mm) | 9.7  | 11.2       | 8.0        | 2.0        | 0.2        | 0.2        | 0.3        | 0.2        | 0.4        | 0.9        | 0.7        | 3.8        | 37.5         |
| Percolación (mm)                | 11.9   | 15.6       | 10.1       | 1.2        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 1.5        | 40.3         |
| Recarga (mm)                    | 0.6  | 0.8        | 0.5        | 0.1        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 0.1        | 2.0          |
| Almacenamiento (mm)             | 24.2   | 21.7       | 6.6        | -8.0       | -6.7       | -4.4       | -3.3       | -3.7       | -2.2       | -2.2       | -2.8       | 16.3       | 35.6         |

*FUENTE: Elaboración propia*

En la **Figura 55** se muestra la relación precipitación – escorrentía de la cuenca Quilca-Vitor-Chili, en esta figura se puede notar una relación directa a causa de eventos de precipitación, lo cual conlleva a pulsos inmediatos luego de estos eventos.



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 55 Relación Precipitación Escorrentía a Nivel Mensual en la Cuenca Quilca-Vitor-Chili (ene 1998 – mar 2017)**

#### 2.7.4 BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA SIGUAS

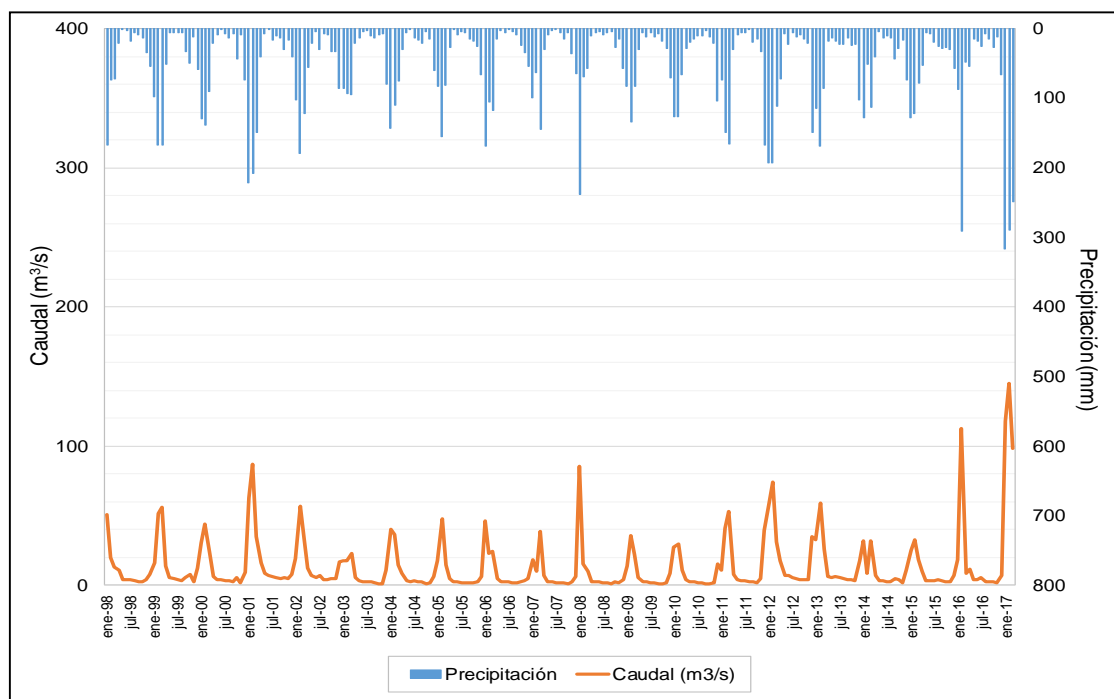
La **Tabla 23** muestra el balance hídrico mensual detallado de la cuenca Siguas, de una extensión de 1879 km<sup>2</sup>. Se nota la misma tendencia que en el área de estudio hidrológico, la percolación, y por consiguiente la recarga que es un porcentaje de esta componente, son nulas durante los meses secos. El mayor aporte se da durante los meses húmedos con 22 mm/mes en promedio. La escorrentía se mantiene durante el año debido al flujo base que aporte de forma continua a la escorrentía total. Y el almacenamiento es positivo en el balance anual (72.5 mm/año) ya que los meses húmedos proveen de suficiente cantidad de agua para suplir la deficiencia en meses secos.

**Tabla 23 Balance Hídrico Promedio Mensual Multianual en la Cuenca Siguas (mm)**

| Cuenca de estudio               | Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Percolación + Recarga + Almacenamiento |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|---------------------------------|---|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                                 | ene   | feb   | mar   | abr  | may  | jun  | jul  | ago  | sep  | oct  | nov  | dic  | Total |
| Precipitación (mm)              | 139.3   | 144.2 | 108.7 | 33.9 | 8.6  | 8.1  | 11.4 | 10.2 | 15.1 | 22.3 | 22.1 | 78.2 | 602.2 |
| Evapotranspiración (mm)         | 54.9  | 54.1  | 55.6  | 34.1 | 14.3 | 11.7 | 13.8 | 12.9 | 15.6 | 22.1 | 22.1 | 41.8 | 353.0 |
| Escorrentía superficial (mm)    | 32.1  | 35.5  | 21.2  | 2.5  | 0.1  | 0.0  | 0.2  | 0.1  | 0.2  | 0.4  | 0.6  | 9.0  | 101.9 |
| Escorrentía subsuperficial (mm) | 19.9  | 22.8  | 16.3  | 3.8  | 0.4  | 0.3  | 0.5  | 0.4  | 0.6  | 1.4  | 1.3  | 7.4  | 75.0  |
| Percolación (mm)                | 22.5  | 26.4  | 16.9  | 2.3  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 3.1  | 71.2  |
| Recarga (mm)                    | 1.1   | 1.3   | 0.8   | 0.1  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.2  | 3.6   |
| Almacenamiento (mm)             | 28.8  | 26.9  | 14.2  | -5.2 | -5.9 | -3.6 | -2.7 | -2.7 | -0.8 | -0.2 | -0.5 | 24.1 | 72.5  |

FUENTE: Elaboración propia

En la **Figura 56** se muestra la relación precipitación – escorrentía de la cuenca Siguas, en esta figura se puede notar una relación directa a causa de eventos de precipitación, lo cual conlleva a pulsos inmediatos luego de estos eventos.



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 56 Relación Precipitación Escorrentía a Nivel Mensual en la Cuenca Siguas (ene 1998 – mar 2017)**



## **2.8 DISTRIBUCIÓN DE LA PERCOLACIÓN Y LA RECARGA**

### **2.8.1 DISTRIBUCIÓN DE LA PERCOLACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO**

La **Figura 57** grafica la distribución de la percolación promedio anual en las cuencas modeladas, como se nota en los balances hídricos, es en los meses húmedos donde se obtiene casi en su totalidad los volúmenes de percolación.

En estos mapas se puede ver que la distribución de la percolación varía entre 10 a 12 mm/año en las cuencas altas de la zona de estudio hidrológico, mientras que en la zona media los valores se fluctúan entre 3 a 7 mm/año. Ya cercanos a la costa, los valores de percolación son casi nulos. De esto se puede concluir que la percolación a causa de una mayor precipitación y el tipo de suelo se encuentra en las cuencas localizadas en la parte alta de la zona de estudio hidrológico.

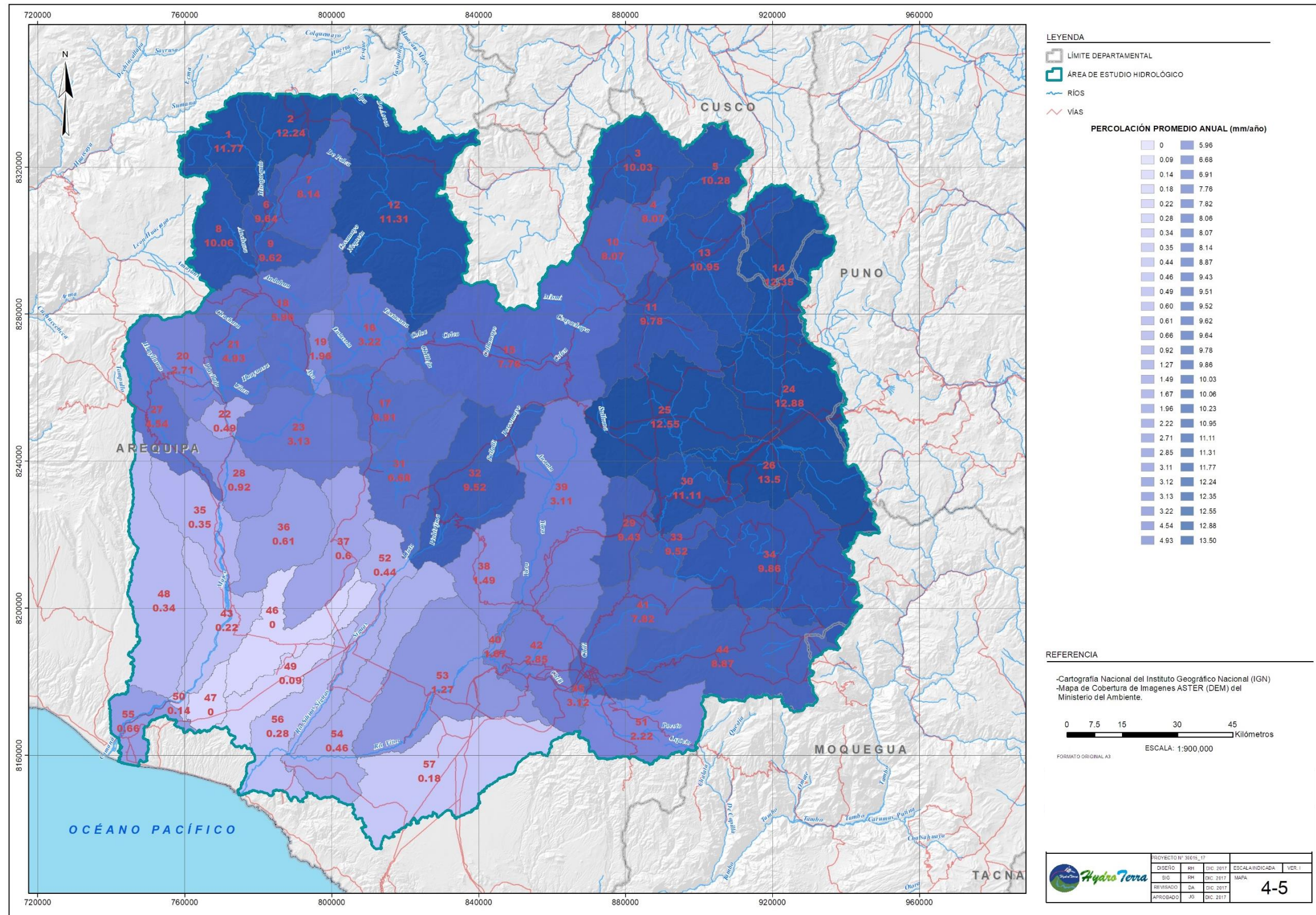


Figura 57 Distribución de la Percolación Promedio Anual

## **2.8.2 DISTRIBUCIÓN DE LA RECARGA EN EL ÁREA DE ESTUDIO**

La **Figura 58** grafica la distribución de la recarga promedio anual en las cuencas modeladas, como se nota en los balances hídricos, es en los meses húmedos donde se obtiene casi en su totalidad los volúmenes de recarga, siendo esta última el 5% de la percolación.

En estos mapas se puede ver que la distribución de la recarga varía entre 0.3 a 0.5 mm/año en las cuencas altas de la zona de estudio hidrológico, mientras que en la zona media los valores se fluctúan entre 0.1 a 0.2 mm/año. Ya cercanos a la costa, los valores de recarga son casi nulos. De esto se puede concluir que la recarga a causa de una mayor precipitación y el tipo de suelo se encuentra en las cuencas localizadas en la parte alta de la zona de estudio hidrológico.

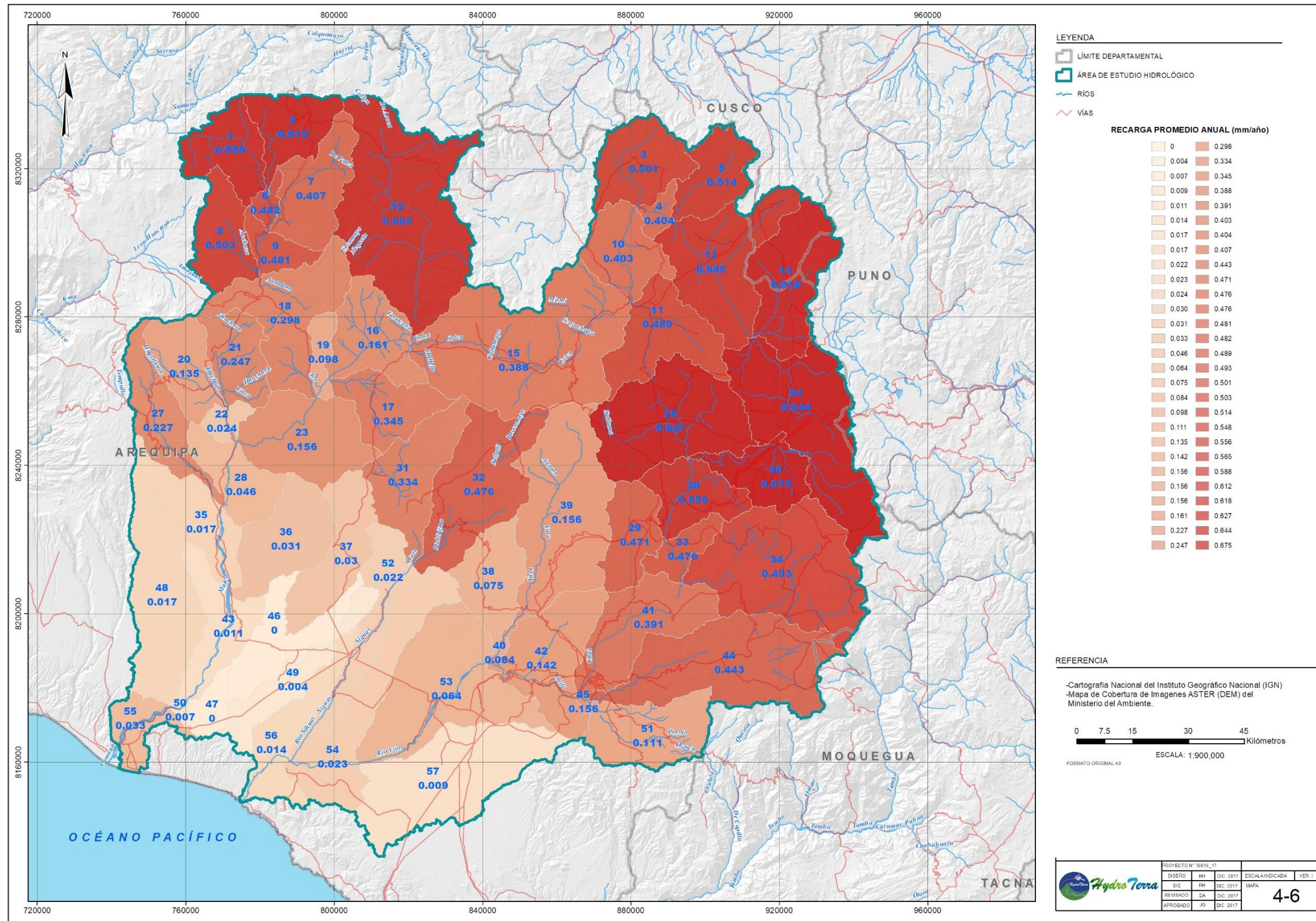


Figura 58 Distribución de la Recarga Promedio Anual

### 3 DESCRIPCIÓN DEL CENTRO LABORAL

#### 3.1 RAZÓN SOCIAL:

*HydroTerra S.A.C.*

#### 3.1.1 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL:





#### **4 DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DESEMPEÑADAS.**

Las funciones de Hidrólogo Principal son las siguientes:

- Desarrollo, investigación y/o adaptación de nuevas metodologías y avances tecnológicos para el desarrollo de estudios hidrológicos.
- La supervisión de los estudios hidrológicos para el sector minero, hidroeléctrico e industria en general.
- Planteamiento de nuevas metodologías para los estudios hidrológicos de impacto ambiental.
- Planteamiento de estudios de hidrológicos para ingeniería.
- Planteamiento de estudios hidrológicos de apoyo a estudios hidrogeológicos.
- Planteamiento de estudios hidrológicos para la toma de decisiones en industria de bebidas.
- Interactuar con otras disciplinas dentro de la empresa o en proyectos de mayor envergadura.





## **5 DESCRIPCIÓN DE SITUACIONES PROBLEMÁTICAS.**

Básicamente, en el Perú, la falta de datos hidrométricos y meteorológicos es el mayor problema que limita de manera importante el desarrollo de estudios hidrológicos y la correcta evaluación de los recursos hídricos para las diferentes actividades humanas. (Curso de Ordenación Cuencas de Pregrado de la Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM).

Uno de los mayores problemas que se tiene en el Perú es el de no contar con datos hidrometeorológicos (principalmente precipitación y caudales) confiables y suficientes. Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), las redes hidrométricas y meteorológicas se encuentran en un estado variable de mantenimiento en función de su situación y del gestor responsable de su operación [ANA, Proyectos Especiales, SENAMHI, Juntas de Usuarios de Riego y otras instituciones]. Estas estaciones miden variables hidrometeorológicas de frecuencia mínima diaria y tiene registros de diferente longitud, lo que da series muy variables en cuanto a la temporalidad. Por otro lado, la densidad y número de estaciones existentes es insuficiente en el marco nacional y más aún, estando estas concentradas principalmente en la zona de la costa del país, donde existe el porcentaje más alto de infraestructura de medición y control, pero donde paralelamente los registros pluviométricos son escasos. Similares condiciones tenemos en términos de información edafológica y de vegetación

Dos situaciones problemáticas consisten en las necesidades de un cliente en el departamento de Arequipa, que necesitaba estudios hidrológicos detallados tanto para (1) ingeniería, abastecimiento de aguas a la operación y para el diseño de estructuras hidráulicas y viales y para (2) medio ambiente, línea base hidrológica para su EIA.

El problema residía no solo en la falta de información puntual y local para la operación, sino que la operación, por su naturaleza tenía una gran área de influencia y por lo tanto necesitaba evaluar los recursos hídricos en las cuencas Camaná, Majes, Sihuas, Quilca-Vitor-Chili (**Sección 2**). Es decir, una gran área lo que complicaba aún más la situación.

## 6 CONTRIBUCIÓN EN LA SOLUCIÓN DE CADA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La solución a ambos problemas consistía en encontrar nuevas fuentes de información sobre precipitaciones con series de tiempo representativas y que cubrieran el territorio nacional completo. Estas fuentes debían ser alternativas a las tradicionales, es decir, a la limitada base de datos del SENAMHI.

Gracias al curso de Ordenación de Cuencas de Pregrado y los estudios de Maestría y Doctorado cursados en la Universidad Católica de Leuven y en la Universidad Libre de Ámsterdam y los cursos y trabajos de investigación desarrollados en la Universidad de Harvard, se decidió usar la información de los satélites Tropical Rainfall Measuring Mission y del Global Precipitation Mission (<https://pmm.nasa.gov/>). Esta base de datos cubre desde noviembre de 1997 hasta el presente.

Esta información, aunque valiosa, no es útil en su formato actual debido principalmente a su baja resolución espacial 25 km por 25 km. Es decir, un solo pixel tiene un área de 625 km<sup>2</sup>.

Sin embargo, existen estudios doctorales que han versado sobre el aumento de resolución (downscaling) de esta información en base a información de la actividad fotosintética.

A continuación, describo brevemente la metodología desarrollada (Jia *et al.*, 2011).

Los datos originales del satélite TRMM (<http://trmm.gsfc.nasa.gov>) nos dan la precipitación promedio cada 3 horas con una resolución espacial de (25 km \* 25 km) para todo el planeta entre los 50° grados Latitud N y S. Esta información, aunque es valiosa, no es útil en este formato y resolución.

Se realizará el aumento de resolución de los conjuntos de datos del TRMM utilizando un método basado en el supuesto de que existe una relación entre el índice de vegetación NDVI (actividad fotosintética que es una función de la humedad del suelo) y la precipitación a diferentes escalas. La información de NDVI tiene una resolución espacial de 1km<sup>2</sup> cada 8 días. Esta relación matemática se utiliza a una escala más fina para generar más detalle en las mallas de precipitación. Se utilizará un método gradual para probar el supuesto.

Primero, se comparará el NDVI promedio desde 1998 hasta el 2016 con la precipitación promedio anual acumulada del satélite TRMM durante el mismo periodo a diferentes

resoluciones (0.25°, 0.50°, 0.75°, 1.00° y 1.25°). Se reducirá la resolución de los datos del NDVI, con una resolución original de 1 km<sup>2</sup> mediante el promedio de las celdas de la malla.

Para cada resolución, se realizará la regresión de los valores del NDVI con respecto a la precipitación TRMM. La resolución que mejor ajuste tuviera es la que se utilizará para el procedimiento de downscaling o aumento de resolución.

En la **Figura 59** mostramos la precipitación del TRMM original, a 25 km por 25 km, y la procesada a 1 km<sup>2</sup> de resolución. La **Figura 60** muestra los resultados ya con la precipitación mensual promedio desde 1998 al 2015 para todo el Perú en donde se pueden ver los diferentes regímenes de precipitación en todo el territorio peruano.

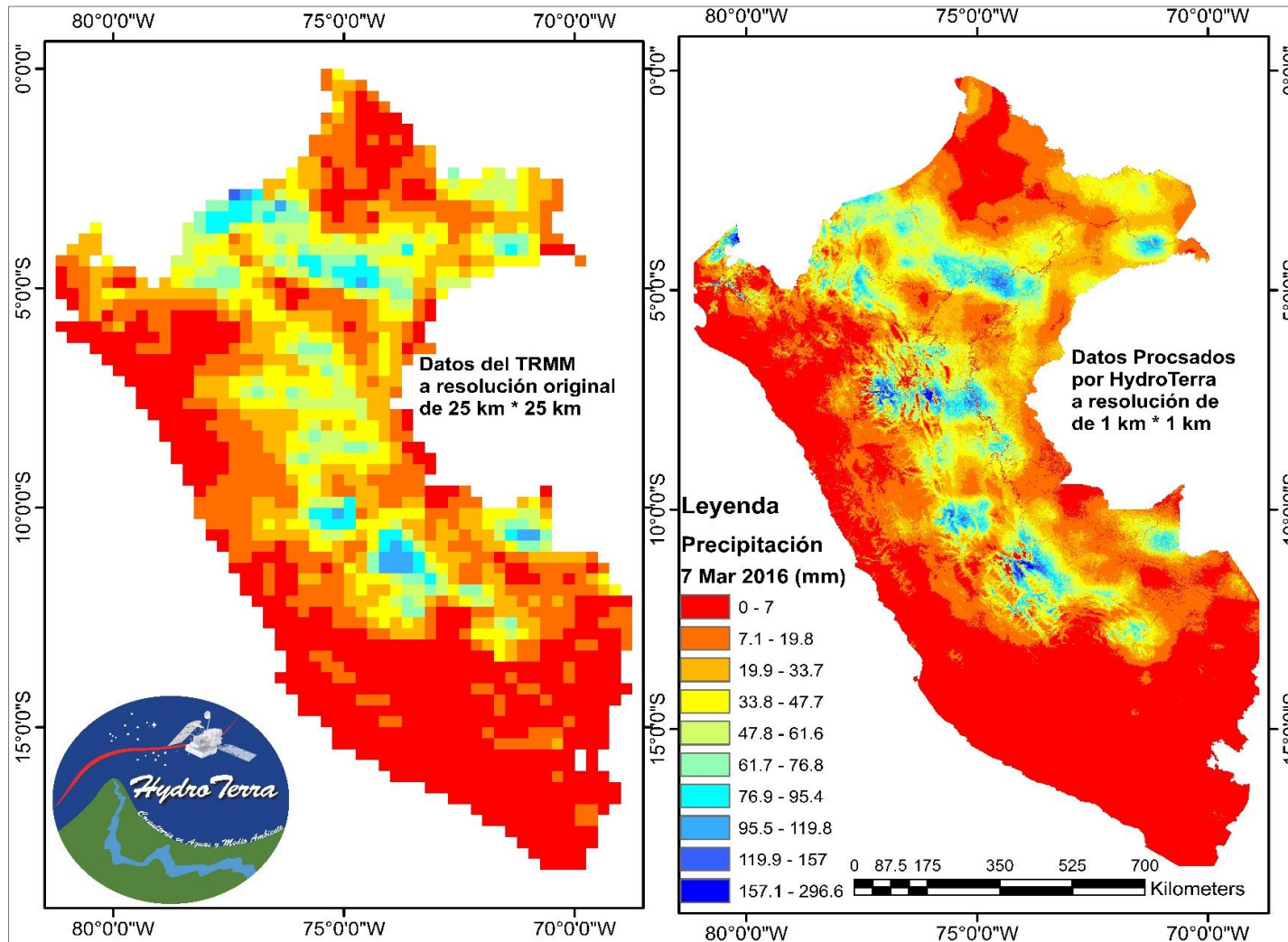
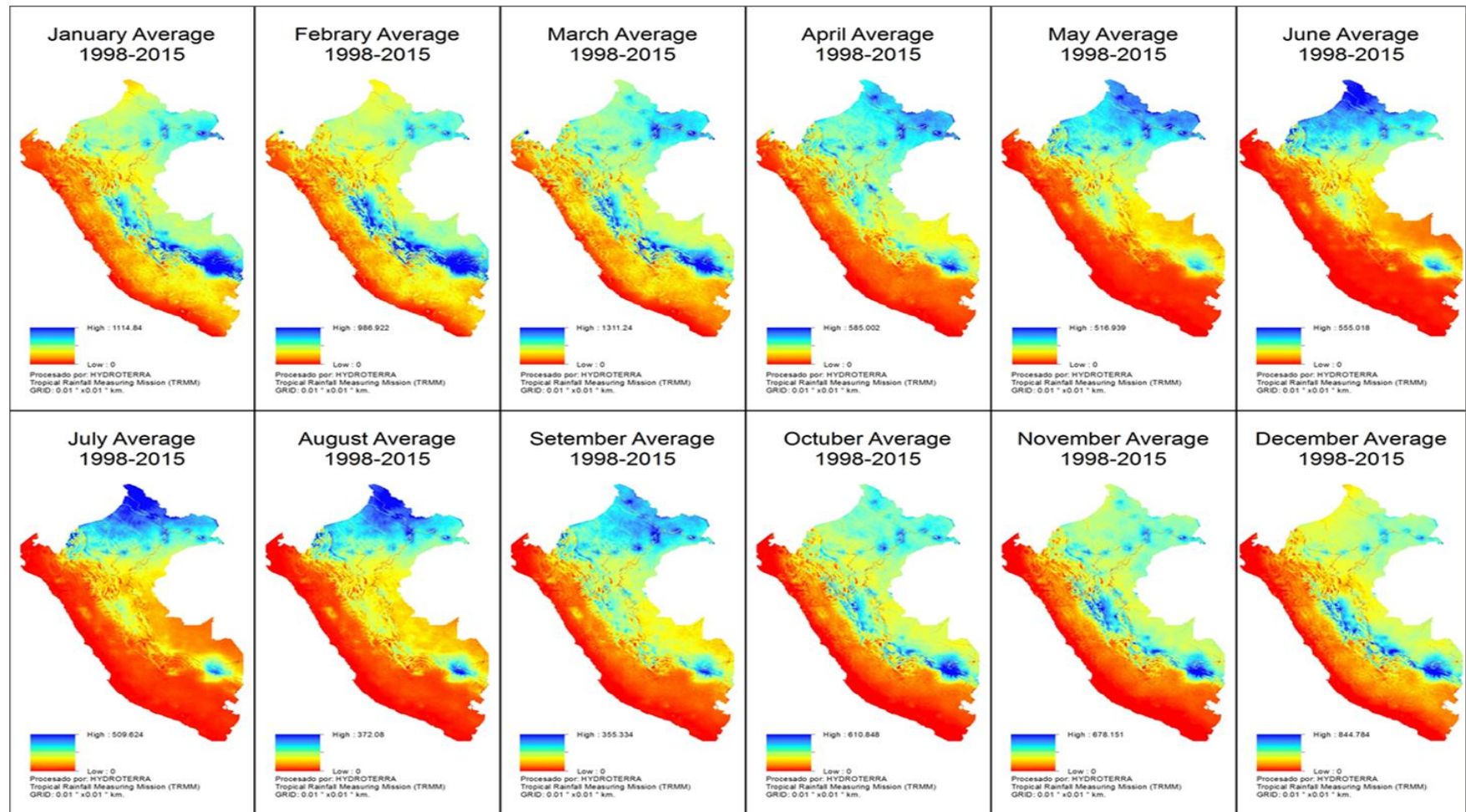


Figura 59 Comparación de la precipitación del TRMM del 7/03/2016 y la procesada por HydroTerra a 1 km<sup>2</sup>.



**Figura 60** Precipitación Promedio Mensual de 1998 al 2015 para todo el país a 1 km<sup>2</sup> de resolución.

## **7 ANÁLISIS DE LA CONTRIBUCIÓN: COMPETENCIAS Y HABILIDADES**

Para hacer este desarrollo innovador en HydroTerra se ha hecho un análisis exhaustivo de la literatura especializada hasta el 2014. El artículo base es el de Jia *et al.*, (2011).

El primer contacto con la realidad peruana y su problemática desde el punto de vista hidrológico – falta de información meteorológica e hidrométrica – tuvo lugar durante el curso de Ordenación de Cuencas de pregrado. Durante este curso se vio la falta de información para realizar la evaluación de recursos hídricos de manera detallada y en base a ello el poder plantear planes de ordenación coherentes y consistentes.

La identificación de fuentes alternativas de información meteorológicas e hidrométrica era necesarias y urgentes.

Se aprendió del potencial de la información satelital sobre todo durante los trabajos desarrollados en la Universidad de Havard durante el 2002 y el 2003 en la División de Ciencias Aplicadas (**DEAS**) para los análisis hidrológicos en Nepal donde lo escaso de la información es una constante.

Esta metodología ha sido aplicada en otros países como España, Brazil, China, etc., y ha dado pie a varias publicaciones doctorales en revistas científicas.

HydroTerra ha aplicado esta metodología en Honduras por ejemplo y se busca desarrollarlo para África.

Las soluciones concretas a los problemas del cliente en Arequipa se resumen a continuación:

- Las simulaciones fueron corroboradas con datos del río Camaná (Figura 2-36).
- Los caudales obtenidos para fines de diseño ingenieriles redujeron los caudales de 233 m<sup>3</sup>/s a menos de 150 m<sup>3</sup>/s lo que implica grandes ahorros para el cliente. Lo mismo se ha presentado para otro cliente en Huancavelica donde el caudal de diseño bajo de 70 m<sup>3</sup>/s a 40 m<sup>3</sup>/s. Estos resultados ya han sido aprobados por las autoridades respectivas.
- Los resultados de la hidrología como línea base para los estudios de impacto ambiental han sido exitosamente utilizados. Por ejemplo, para otro cliente en la Libertad se logró

calcular los impactos hidrológicos antes y después del desarrollo de las operaciones del cliente. Este estudio de EIA fue parte de un estudio aprobado por MINEM.

- Se han obtenido caudales por microcuencas para el diseño de estructuras hidráulicas de protección para los componentes de la operación.

## **8 BENEFICIO OBTENIDO POR EL CENTRO LABORAL**

HydroTerra S.A.C. es una empresa especializada en estudios hidrológicos, hidrogeológicos y medio ambientales. Empezó a funcionar en agosto del 2016. Hasta el momento sus clientes se encuentran en 3 sectores: Mediana y gran minería, Hidroeléctricas y en Industria de bebidas.

En todos los estudios realizados para sus clientes, HydroTerra y todas las otras empresas similares, encuentran que la limitante de datos meteorológicos e hidrométricos representa un problema casi insalvable y que afecta directamente la calidad de los resultados.

Por ejemplo, en los estudios de ingeniería, en donde se requieren calcular los caudales máximos con diferentes periodos de retorno y las rasantes en los estudios hidráulicos, los márgenes de incertidumbre son tan grandes que los profesionales asumen factores tan altos que hasta cuadruplican los caudales calculados. Por ejemplo, para este cliente de Arequipa, el caudal de diseño, otra compañía calculó el caudal de diseño en 233 m<sup>3</sup>/s aproximadamente con un retorno de periodo de 1000 años. Nuestros estudios estimaron que el caudal de diseño es de 81 m<sup>3</sup>/s y con un factor de seguridad del 0.5 más llegaría a los 120 m<sup>3</sup>/s. Esto tiene repercusiones importantes en los costos del cliente.

La hidrología satelital ha demostrado proporcionar mejores resultados en repetidas ocasiones y con niveles de incertidumbre mucho más bajos y aceptables. Y los estudios han sido aceptados por las autoridades como el ANA y el MINEM.

Actualmente, los clientes nos están contratando para revisar los estudios hidrológicos de empresas consultoras más grandes y experimentadas.

Gracias a estos desarrollos metodológicos y tecnológicos, HydroTerra se está posicionando con éxito en el mercado gracias a la diferenciación tecnológica.

La hidrología satelital se ha logrado posicionar como elemento efectivo de marketing logrando entrar en operaciones de mediana y gran minería, hidroeléctricas e industria de bebidas.

HydroTerra ha logrado, gracias a esta diferenciación tecnológica, competir con empresas mucho más grande y de mucha más experiencia en el mercado.



Los precios por estos estudios se han logrado realizar a precios por encima del promedio del mercado.

Se han logrado obtener contratos por otorgamiento directo gracias a la metodología única.

Además, hemos logrado ayudar a que estudios de otras disciplinas como los estudios hidrogeológicos y de ingeniería puedan competir con empresas más grandes.

La hidrología satelital forma la base de otros desarrollos innovadores en línea como, por ejemplo, el uso de información de otros satélites para la evaluación de aguas subterráneas a nivel regional y local.

## 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La hidrología satelital ha demostrado ser una herramienta efectiva en diferentes zonas del país.
- Ha logrado ser aceptado por las autoridades como parte de los estudios oficiales de empresas en diferentes sectores.
- Ha demostrado ser elemento diferenciador tecnológico para **HydroTerra** y es la base de otros desarrollos tecnológicos.
- Se recomienda:
  - Desarrollar metodologías similares para la evaluación de aguas subterráneas.
  - Adoptar el uso de tecnologías e información satelital para estudios de línea base y de estimación de impactos ambientales.
  - Adaptar el uso de tecnología satelital para el monitoreo y creación de sistemas de alerta temprana para inundaciones, sequías, y eventos extremos.

A continuación, se detallan las conclusiones del trabajo técnico:

- 1) Se comprueba la alta correlación estadística de los registros de las estaciones virtuales TRMM extraídas con respecto al registro de las estaciones meteorológicas del SENAMHI. Por consiguiente, se determina como homogénea el área de estudio hidrológico y se extraen 57 estaciones virtuales TRMM, con la finalidad de obtener un periodo de registro diario a una resolución de  $1\text{km}^2$ , de tal manera que se capte la variabilidad de la precipitación en toda el área de estudio hidrológico (**Figura 17**). Los valores de precipitación indican una variación de acuerdo al piso altitudinal, con valores anuales que van desde 600 a 1600 mm/año, en la parte alta, y valores menores (200 a 500 mm/año en la parte media que en proporción ocupa una mayor extensión en el área de estudio.
- 2) Los datos climáticos fueron obtenidos a partir de información de la NASA con registros a partir del 01 de enero de 1983; los cuales muestran que la radiación solar tiene valores promedio de  $22\text{ kWh/m}^2$  en la parte alta de la zona de estudio y de  $20\text{ kWh/m}^2$  en la parte baja. La temperatura mínima promedio es de  $1\text{ }^\circ\text{C}$  en la parte alta, mientras que en la parte baja es de  $14\text{ }^\circ\text{C}$ . La humedad relativa es de 60% y de 70% entre los meses de enero a abril en la parte alta y baja respectivamente, siendo

menor en 10% entre los meses de mayo a noviembre. Los vientos alcanzan velocidades de 1.5 m/s en promedio en la parte alta con escasa variabilidad durante el transcurso del año, caso contrario de la parte baja donde la variabilidad es alta y los promedios van de 2 a 2.5 m/s.

- 3) Dada las características de la zona de estudio y los datos disponibles se hace necesario utilizar el programa SWAT ya que es uno de los pocos softwares que utiliza la metodología aprobada por la FAO (Pennan Monteith) para determinar la evapotranspiración, componente sumamente importante para el balance hídrico de las cuencas. Además, puede incluir inputs meteorológicos a escala diaria, beneficiando así, la información con la que HydroTerra cuenta: información pluviométrica diaria para 57 estaciones virtuales a lo largo de la zona de estudio desde el año 1998 y con información climática diaria de la NASA a partir del año 1983.
- 4) La simulación con el modelo hidrológico SWAT abarcó el periodo de enero 1998 a marzo del 2017, en el área hidrológica que contiene a las cuencas Camaná y Quilca-Vitor-Chili. Previo a ello se preparó y evaluó los inputs necesarios para el modelo (precipitación, suelo, uso de suelo, pendientes).
- 5) En base a información del MINAGRI, se elaboró un mapa de suelo cuya interpretación hidrológica indica que la zona de estudio tiene una capacidad de infiltración moderada al estar conformada, por leptosoles en dos de sus variantes: dístico (56.5%) y lítico (16.9%). Estos son un tipo de suelos que se encuentran bajo constantes procesos de erosión hídrica y eólica, son suelos poco compactados, con buena o moderada infiltración y bien drenados. La distribución espacial de estos tipos de suelo se ilustra en el **Figura 42**.
- 6) El tipo de cobertura está compuesta por diversos tipos en función a la variación de la altitud. En la parte alta, predomina el Pajonal Altoandino con un 30.5% y Tundra con un 23.7%. En la parte intermedia se puede encontrar en mayor proporción, Matorral Semiárido templado con una proporción de 12.8%. Aguas debajo del área de estudio hidrológico, en mayor proporción se encuentra el desierto semicálido, seguido de pequeñas zonas con lomas, centros poblados y actividad agropecuaria. La distribución espacial de estas coberturas se ilustra en la **Figura 43**.

- 7) Según este balance obtenido como output del modelo hidrológico SWAT, la precipitación promedio de la zona de estudio hidrológico es de 550.7 mm/año. La escorrentía **superficial total** está compuesta por la suma de las siguientes componentes: escorrentía superficial (72.05 mm/año), flujos laterales o escorrentía subsuperficial (55.8 mm/año) y flujo de retorno de las aguas subterráneas (51.8 mm/año); estas últimas reingresan al sistema como escorrentía al no poder llegar a los acuíferos profundos a causa de la presencia de leptosoles de poca compactación en los estratos más superficiales, y con capas más compactas en profundidad. La sumatoria de las componentes presentadas forman la escorrentía total, la cual representa el 33% de la precipitación.
- 8) La percolación (75.41 mm/año) representa el 15% con respecto a la precipitación, producto de los ya mencionados estratos poco compactados en las capas superficiales que favorecen a la infiltración entre los poros. De esta componente, el volumen de agua que llega a los estratos más profundos y se transforma en recarga a los acuíferos profundos es 3.77 mm/año, y que representa el 5% de aporte con respecto a la percolación.
- 9) La distribución de la percolación (**Figura 57**) varía entre 10 a 12 mm/año en las cuencas altas de la zona de estudio hidrológico, mientras que en la zona media los valores se fluctúan entre 3 a 7 mm/año. Ya cercanos a la costa, los valores de percolación son casi nulos. De esto se puede concluir que la percolación a causa de una mayor precipitación y el tipo de suelo se encuentra en las cuencas localizadas en la parte alta de la zona de estudio hidrológico.
- 10) La distribución de la recarga (**Figura 58**) varía entre 0.3 a 0.5 mm/año en las cuencas altas de la zona de estudio hidrológico, mientras que en la zona media los valores se fluctúan entre 0.1 a 0.2 mm/año. Ya cercanos a la costa, los valores de recarga son casi nulos. De esto se puede concluir que la recarga a causa de una mayor precipitación y el tipo de suelo se encuentra en las cuencas localizadas en la parte alta de la zona de estudio hidrológico.

## 10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUTODEMA (2010). Estudio de actualización del balance hídrico del sistema Colca Siglas para la renovación de reservas y otros. Informe Final. Gobierno Regional de Arequipa. Autoridad Autónoma de Majes.
- Brunet Moret, Y., 1979. *Homogenización de la precipitación, Cuadernos Hidrológicos Vol. XVI, N° 3 y 4, p. 147-170.*
- Hiez, G., 1977. *Homogeneidad de series pluviométricas, Cuadernos Hidrológicos Vol. XIV, N° 2 p. 129-163.*
- HidroEsta: *Manual de Usuario. 300 pags. Editorial: Centro de Información Tecnológica (CIT), Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago-Costa rica. 2004.*
- INCLAM, 2015. Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca Camaná-Majes-Colca. ANA, p. 805.
- Jia, S., Zhu, W., Lu, A., Yan, T. 2011. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China. *Remote Sensing Environment*, 115, 3069 – 3079.
- Moriasi, D, et al., 2002. Model Evaluation Guideline for systematic Quantification of accuracy in watershed simulation. Soil and water division of ASABE. 2007.
- Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN), 1980. *Inventario y evaluación nacional de aguas superficiales.*
- Reyes Trujillo, A, 2011. *Guía Básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Programa Editorial Universidad del Valle, 2010.*
- Texas Water Resources Institute, 2011. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 200.*