

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN DE LA INTERCUENCA ALTO HUALLAGA HACIENDO USO DE LA
HIDROLOGÍA DE BOSQUES**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO CIVIL**, que presenta el bachiller:

SANDRA YESENIA CARRIÓN MOGOLLÓN

ASESORADO POR:

MSc. MITCHEL JIMMY JARA GARCÍA

Lima, Setiembre 2018

Dedicatoria

A mi padre Juan, por el apoyo y sacrificio realizado para cumplir mis logros profesionales.

A mi madre Silvana, por su amor, paciencia y buenos consejos que me guían a lo largo de mi camino.

A mis hermanos, Giuliana y Juan Diego, por su amistad, cariño y buenos deseos brindados.

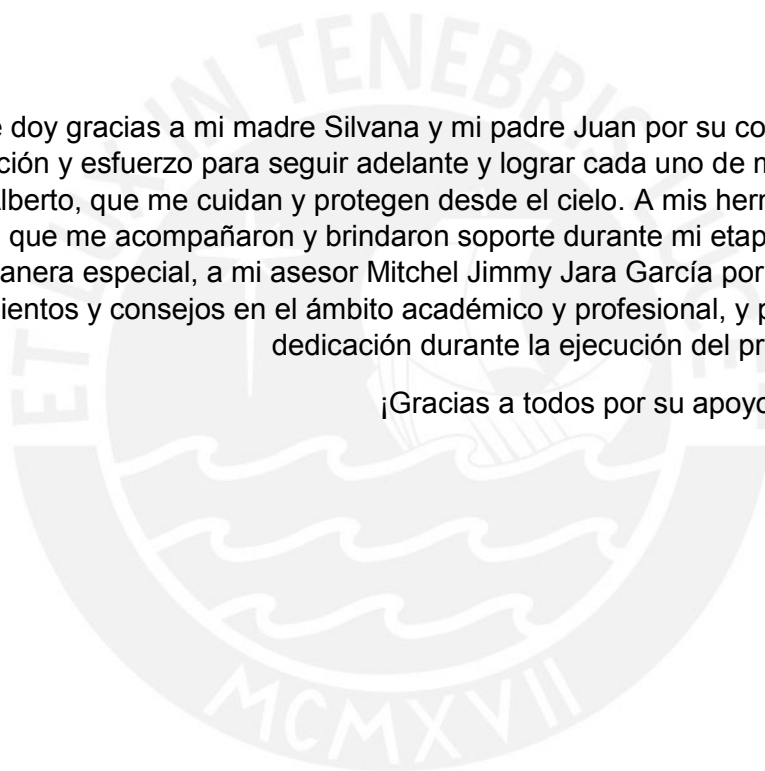
A mis maestros, amigos y demás familiares, por la confianza depositada en mí.

Agradecimientos

Le doy gracias a mi madre Silvana y mi padre Juan por su constante apoyo, dedicación y esfuerzo para seguir adelante y lograr cada uno de mis objetivos. A Trinidad y Alberto, que me cuidan y protegen desde el cielo. A mis hermanos, primos, tíos y amigos que me acompañaron y brindaron soporte durante mi etapa universitaria.

De manera especial, a mi asesor Mitchel Jimmy Jara García por brindarme sus conocimientos y consejos en el ámbito académico y profesional, y por su tiempo y dedicación durante la ejecución del presente trabajo.

¡Gracias a todos por su apoyo incondicional!



RESUMEN

El Perú es un país conformado, en más del 50% del territorio, por bosques que son amenazados por procesos de deforestación. Actividades agrícolas, ganaderas, mineras y el desarrollo de grandes proyectos de infraestructura son las principales causas de la degradante situación. Por ello, resulta necesario contribuir con la investigación de los respectivos ecosistemas, a partir de la hidrología de bosques, que estudia la importancia de la cubierta vegetal y la relación que posee sobre los principales recursos de la cuenca como el agua y el suelo (Martínez y Navarro, 1996).

La cuenca del Río Huallaga, que está constituida en el 85% de su superficie por bosques de montaña (ANA, 2015), es importante, debido a la variedad de recursos que aporta para el desarrollo económico; sin embargo, ha presentado altas tasas de deforestación a lo largo de los años. Por ejemplo, la cuenca ha sido reconocida como Primer Valle Productivo Agrícola (PCM, 2015), originándose la expansión de terrenos para cultivos, en su mayoría con procedimientos informales. Asimismo, el potencial energético de la región permite el desarrollo de proyectos hidroeléctricos en la cuenca que requieren de estudios del impacto sobre los bosques, ya que, al deforestarlos, se pierde su capacidad de almacenar el agua, y el control de procesos erosivos y deslizamientos.

En consecuencia, el presente trabajo busca estimar las tasas de erosión y el aumento o disminución de escorrentía superficial en la Intercuenca Alto Huallaga, hasta la ciudad de Tingo María. La degradación de bosques será evaluada a partir de la tasa de erosión laminar del suelo, utilizando la Ecuación de Pérdida de Suelos (USLE) planteada por Smith y Wischmeier (1978). Para el análisis, se consideran factores presentes en la cuenca como la erodabilidad de lluvia, erodabilidad del suelo, topografía, tipo de cobertura vegetal y prácticas de manejo de erosión, que, a partir de herramientas de sistema de información geográfica, serán integrados para cuantificar la tasa de erosión anual.

De igual manera, se estima la producción de escorrentía superficial a partir del modelo francés GR2M, que utiliza valores de precipitación y temperatura media mensual para conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca. Con los resultados obtenidos, se determina si existe relación entre las tasas de erosión y el aumento o disminución de caudales, producto de la deforestación. Además, se identificarán las zonas con mayor afectación de bosques que podrán ser utilizados para plantear medidas correctivas, prevenir y controlar la pérdida total de los bosques de montaña.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLAS	ix
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
2. CAPÍTULO II: GENERALIDADES.....	3
2.1. Objetivo General	3
2.1.1 Objetivos Específicos	3
2.2. Hipótesis	3
3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	4
4. CAPÍTULO IV: ANTECEDENTES.....	8
5. CAPÍTULO V: ESTADO DEL ARTE.....	10
5.1. Conceptos de Hidrología de Bosques	10
5.1.1 Precipitación	10
5.1.2 Agua por interceptación de niebla.....	11
5.1.3 Escorrentía superficial e infiltración	11
5.1.4 Evapotranspiración	13
5.1.5 Efectos en la hidrología al cambiar el uso del suelo de los Bosques	14
5.2. Conceptos de Erosión de Suelos	15
5.2.1 Definición de Erosión.....	15
5.2.2 Erosión Hídrica	15
5.2.2.1 Tipos de erosión hídrica	17
5.2.3 Principales factores que afectan a la erosión.....	17
5.2.3.1 Clima.....	17
5.2.3.2 Vegetación	18
5.2.3.3 Tipo de suelo	18
5.2.3.4 Topografía.....	19
5.2.4 Pérdida de suelo debido a la erosión en bosques andinos	19
5.3. Sistema de Información Geográfica en los Bosques	20
6. CAPÍTULO XI: INFORMACIÓN BÁSICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	22

6.1.	Aspectos generales.....	22
6.1.1	Caracterización de la zona de estudio Intercuenca Alto Huallaga hasta la ciudad de Tingo María	23
7.	CAPÍTULO VII: IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	30
7.1.	Métodos de estimación de la erosión en bosques - Método USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos).....	30
7.1.1	Índice de erosión pluvial R.....	31
7.1.2	Índice de erodabilidad del suelo K	34
7.1.3	Factor topográfico LS de la cuenca	36
7.1.4	Factor de Cobertura Vegetal C	37
7.1.5	Factor de prácticas de prevención y control de erosión P.....	44
7.2.	Análisis hidrológico de la cuenca a partir del modelo GR2M	44
7.2.1	Descripción general del modelo hidrológico.....	44
7.2.2	Clasificación de modelos	45
7.2.2.1	Modelos determinísticos.....	45
7.2.2.2	Modelos estocásticos.....	45
7.2.3	Descripción del Modelo GR2M	46
7.2.4	Aplicación del Modelo GR2M.....	51
7.2.4.1	Análisis de datos	51
7.2.4.1.1.	Análisis de consistencia de información.....	51
7.2.4.1.1.1	Análisis estadístico de saltos y tendencias.....	51
7.2.4.1.1.2	Análisis de Doble Masa.....	52
7.2.4.1.2.	Completación y extensión de datos faltantes.....	57
7.2.4.2	Cálculo de la Evapotranspiración	58
7.2.4.3	Proceso de Calibración y Validación del modelo GR2M.....	60
12.2.4.3.1.	Eficiencia de Nash-Sutcliffe.....	61
12.2.4.3.2.	Coefficiente de determinación (R^2).....	61
8.	CAPÍTULO VIII: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
8.1.	Resultados de pérdida de suelos	62

8.1.1	Mapa de factor R (erodabilidad de lluvia), Mapa de Factor K (erodabilidad del suelo) y Factor topográfico LS	62
8.1.2	Mapa de factor C (manejo del suelo y cobertura vegetal)	63
8.1.3	Mapa de pérdida de suelo en los años 1990, 2005, 2014 y 2017	64
8.2.	Esorrentía superficial en el área de estudio a partir del modelo GR2M.....	78
8.2.1	Proceso de Calibración.....	78
8.2.2	Proceso de validación.....	79
8.3.	Relación entre tasa de erosión y esorrentía superficial en Bosques montanos de la Intercuenca Alto Huallaga	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		78
BIBLIOGRAFÍA.....		81
ANEXOS.....		87



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Flujo del procedimiento para el análisis Hidrológico. Fuente propia.	5
Figura 2. Diagrama de Flujo del procedimiento para el cálculo de tasas de erosión. Fuente propia.....	6
Figura 3. Ilustración y definición de horizontes que conforman el suelo. Fuente propia.	13
Figura 4. Procesos de erosión hídrica representado en desprendimiento, transporte y depósito de material. Fuente: SENAMHI, 2017, p.5.	16
Figura 5. Unidades hidrográficas de la Cuenca del Río Huallaga. Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2013, p.6	22
Figura 6. Perfil del cauce del Río Huallaga. Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2015, p.68	23
Figura 7. Ubicación de la cuenca de estudio. Fuente propia.	25
Figura 8. Mapa de Cobertura Vegetal de la cuenca. Fuente Propia.	26
Figura 9. Bosques en el departamento de Huánuco. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2018. Recuperado de http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php 28	
Figura 10. Pérdida de Bosques en el departamento de Huánuco. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2018. Recuperado de http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php	28
Figura 11. Concentración de pérdida de bosques en la región Huánuco. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2018. Recuperado de http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php	29
Figura 12. Mapa de estaciones meteorológicas. Fuente propia.	33
Figura 13. Índice de Vegetación de diferencia normalizada NDVI para el año 1990. Fuente propia.....	39
Figura 14. Índice de Vegetación de diferencia normalizada NDVI para el año 2005. Fuente propia.....	40
Figura 15. Índice de Vegetación de diferencia normalizada NDVI para el año 2014. Fuente propia.....	41
Figura 16. Índice de Vegetación de diferencia normalizada NDVI para el año 2017. Fuente propia.....	42
Figura 17. Clasificación de modelos hidrológicos. Fuente: Ven Te Chow, 1994, p.11. 45	
Figura 18. Diagrama de estructura inicial del modelo. Fuente: Mouelhi et al., 2005, p. 205.	47

Figura 19. Gráfico de criterios de eficiencia de las posibles versiones de esquemas del modelo GR2M en función del número de parámetros libres. Fuente: Mouelhi et al., 2005, p. 207.....	47
Figura 20. Estructura del modelo GR2M. Fuente: CEMAGREF.	48
Figura 21. Esquema de la transformación de la precipitación a caudal de salida en la cuenca de estudio. Fuente: SENAMHI, 2016.	49
Figura 22. Análisis de doble masa Grupo 1. Estaciones meteorológicas Oyón, San Rafael y Yanahuanca.....	53
Figura 23. Análisis de doble masa estación San Rafael-Oyón.....	53
Figura 24. Análisis doble masa estación San Rafael- Yanahuanca.....	54
Figura 25. Análisis de doble masa Grupo 2. Estaciones meteorológicas Huánuco y Canchán.	54
Figura 26. Análisis doble masa estación Huánuco-Canchán.....	55
Figura 27. Análisis de doble masa Grupo 3. Estaciones meteorológicas Carpish, Chaglla y Tingo María.....	55
Figura 28. Análisis doble masa estación Tingo María-Carpish.....	56
Figura 29. Análisis doble masa estación Tingo María-Chaglla.	56
Figura 30. Precipitación total mensual promedio de estaciones meteorológicas en el área de estudio. Fuente propia.	57
Figura 31. Serie temporal de caudales en Tingo María. Fuente: ANA, 2015.....	58
Figura 32. Polígonos Thiessen generados para cada estación meteorológica. Fuente propia.	59
Figura 33. Factores de corrección para evapotranspiración. Fuente: Chereque, 1989, p.57.	60
Figura 34. Valores de Evapotranspiración de la Intercuenca Alto Huallaga calculados. Fuente propia.....	60
Figura 35. Mapa de Factor R de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.	66
Figura 36. Mapa de Factor K de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.....	67
Figura 37. Mapa de Factor LS de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.....	68
Figura 38. Mapa de Factor C para el año 1990 de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.	69
Figura 39. Mapa de Factor C para el año 2005 de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.	70
Figura 40. Mapa de Factor C para el año 2014 de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.	71
Figura 41. Mapa de Factor C para el año 2017 de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.	72

Figura 42. Mapa de Tasa de Erosión para el año 1990 en la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.....	74
Figura 43. Mapa de Tasa de Erosión para el año 2005 en la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.....	75
Figura 44. Mapa de Tasa de Erosión para el año 2014 en la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.....	76
Figura 45. Mapa de Tasa de Erosión para el año 2017 en la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.....	77
Figura 46. Correlación entre caudal generado y caudal observado - Intercuenca Alto Huallaga 1980-2002. Fuente propia.....	79
Figura 47. Correlación entre caudal generado y caudal observado - Intercuenca Alto Huallaga 1980-2002. Fuente propia.....	80
<i>Figura 48. Caudales simulados comparados con los caudales observados - Intercuenca Alto Huallaga 1980-2002. Fuente propia.</i>	<i>80</i>
Figura 49. Caudales simulados comparados con los caudales observados - Intercuenca Alto Huallaga 2003-2018. Fuente propia.	77
Figura 50. Mapa de tasa de erosión en bosques en el año 1990. Fuente propia.	79
Figura 51. Mapa de tasa de erosión de bosques en el año 2005. Fuente propia.	80
Figura 52. Mapa de tasa de erosión en bosques en el año 2014. Fuente propia.	81
Figura 53. Mapa de tasa de erosión en bosques en el año 2017. Fuente propia.	82
Figura 54. Mapa de variación del grado de erosión de bosques entre los años 1990 y 2005. Fuente propia.....	84
Figura 55. Mapa de variación del grado de erosión de bosques entre los años 1990 y 2014. Fuente propia.....	85
Figura 56. Mapa de variación del grado de erosión de bosques entre los años 1990 y 2017. Fuente propia.....	86
Figura 57. Gráfico de Caudal medio mensual generado vs Erosión anual en Bosques de montaña de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de entrada utilizados para estimar los factores que expresan la pérdida de suelo en la cuenca y el análisis hidrológico. Fuente: Elaboración Propia.	7
Tabla 2. Bosques de Montaña en cuenca de estudio. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2015, p.44-52	27
Tabla 3. Estaciones meteorológicas dentro de la cuenca. Fuente propia.....	31
Tabla 4. Factor F y R para cada registro de precipitación en las 5 estaciones de estudio. Fuente propia.	32
Tabla 5. Porcentajes de Arena, Limo, Arcilla y Carbón orgánico de los tipos de suelo considerados en la cuenca de estudio. Fuente: FAO, 1981. Recuperado de http://www.fao.org/soils-portal	34
Tabla 6. Valores de parámetro s para aplicar en el factor K en ecuación USLE. Fuente: Suarez, 2001, p.39.	35
Tabla 7. Valores de permeabilidad media para diferentes texturas del suelo en cm/hora. Fuente: FAO. Recuperado de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm	35
Tabla 8. Índice de permeabilidad p para aplicar en el factor K en Ecuación USLE. Fuente: Mancilla, 2008, p.16.....	35
Tabla 9. Detalle de imágenes satelitales empleadas en el estudio. Fuente propia.....	37
Tabla 10. Valores del Factor C. Fuente: Dumas, 2012, p.28.....	38
Tabla 11. Tabla de Valores de Factor C para Ecuación USLE. Fuente: Morgan, 2005, p.122.	43
Tabla 12. NDVI del territorio y tipo de cubierta. Fuente propia.....	44
Tabla 13. Parámetros libres de esquema inicial del modelo GR2M.	47
Tabla 14. Estaciones meteorológicas agrupadas para el análisis de doble masa. Fuente propia.....	52
Tabla 15. Clasificación de coeficientes de ajuste Nash-Sutcliffe. Fuente: SENAMHI, 2017, p. 13.....	61
Tabla 16. Clasificación del grado de erosión de la pérdida de suelo.	64
Tabla 17. Distribución de áreas según grados de erosión laminar de suelos para los años 1990, 2005, 2014 y 2017 en la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.	73
Tabla 18. Resultados de criterios de eficiencia en la Intercuenca Alto Huallaga 1980-2002. Fuente propia.....	78
Tabla 19. Resultados de parámetros calculados en la Intercuenca Alto Huallaga 1980-2002. Fuente propia.....	78

Tabla 20. Resultados de criterios de eficiencia- Intercuenca Alto Huallaga 2003-2013. Fuente propia.....	79
Tabla 21. Clasificación del área afectada por erosión en Bosques en los años 1990, 2005, 2014 y 2017. Fuente propia.	83
Tabla 22. Erosión total (ton/año) en Bosques de la cuenca de estudio. Fuente Propia.	83
Tabla 23. Caudales (m ³ /s) generados por el modelo GR2M para los años de análisis. Fuente propia.....	87



1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis evalúa un tramo de la Intercuenca Alto Huallaga, hasta la ciudad de Tingo María, ubicada en el departamento de Huánuco, a partir de la hidrología de bosques, analizando las consecuencias que trae consigo la deforestación de bosques montanos interandinos existentes en la región. La evaluación se realizará cuantificando la variación de parámetros hidrológicos con mayor incidencia en la zona, como precipitación, evapotranspiración y caudal generado dentro de la cuenca, así como la pérdida de suelo originada por el cambio de uso de tierra, expresado en tasa de erosión anual.

El Perú posee cerca de 73 millones de hectáreas de bosques, el 90% pertenece a los bosques de selva alta y baja ubicados en la Amazonía (SERFOR, 2015), que se encuentran en peligro constante de deforestación por causas como minería ilegal, incremento de actividades agrícolas y ganaderas. Las cifras de deforestación para el primer semestre del presente año indican la pérdida de 23,204.16 hectáreas de bosques amazónicos principalmente en los departamentos de Loreto (5,492.16 hectáreas perdidas), Madre de Dios (4,308.57 ha), Ucayali (3,670.29 ha) y San Martín (3,093.39 ha) (PNCBMCC, 2018).

Los bosques son ecosistemas que contribuyen con la producción y regulación hídrica de las cuencas a lo largo del territorio. Retienen gran cantidad de agua que desemboca en las partes bajas de las cuencas y son destinadas, en el caso de cuencas altas y medias, para uso industrial, agrícola y poblacional. De este modo, se observa la importancia de la conservación y buenas prácticas en el uso del suelo de los bosques para aprovechar su recurso hídrico.

El impacto que origina la remoción de cobertura vegetal en la hidrología de bosques se ve reflejado en la variación de parámetros hidrológicos; por ejemplo, el caudal producido dentro de la cuenca. Al no contar con vegetación que absorba el agua proveniente de las lluvias o la nubosidad de los bosques andinos, gran porcentaje de las precipitaciones se expresa como escorrentía superficial. De igual modo, se producen cambios en las características del suelo, como su capacidad de infiltración y retención de agua. Los impactos se observan en épocas de estiaje, ya que no se cuenta con una recarga de agua para abastecer a las cuencas, y durante épocas de crecida, en donde el caudal aumenta considerablemente, perdiendo su capacidad de regulación hídrica. Por lo tanto, el aumento de la tasa de escorrentía superficial provoca la pérdida y degradación del

suelo que se cuantificará y analizará a partir de la tasa de erosión anual producida en la cuenca en estudio.

Por tal motivo, se realizará el análisis hidrológico de la cuenca utilizando el modelo GR2M y se cuantificará la tasa de erosión del suelo mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para los años 1990, 2005, 2014 y 2017. Se utilizarán herramientas de Sistema de información Geográfica (SIG) para trabajar y espacializar los datos en base a resultados deseados obtenidos. Finalmente, se identificará la relación existente entre la variación de las características hidrológicas de los bosques, expresadas en tendencias de series temporales de caudales, y la pérdida de suelo, cuantificada a partir de la tasa de erosión.



2. CAPÍTULO II: GENERALIDADES

2.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento hidrológico en la Intercuenca Alto Huallaga hasta la ciudad de Tingo María y cuantificar la degradación del suelo a partir de la tasa de erosión.

2.1.1 Objetivos Específicos

- Estimar la tasa de erosión laminar en la cuenca de estudio en los años 1990, 2005, 2014 y 2017.
- Determinar la producción de escorrentía superficial.
- Evaluar la relación entre tasa de erosión y escorrentía superficial dentro de la cuenca.

2.2. Hipótesis

La deforestación de bosques de montaña de la Intercuenca Alto Huallaga hasta la ciudad de Tingo María, originará que se pierda gran porcentaje de cobertura vegetal, aumentando la escorrentía superficial y produciendo altas tasas de erosión en el territorio.

3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

En primera instancia, se realiza la delimitación de la cuenca a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM) obtenido del ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) desarrollado por la NASA (U.S. National Aeronautics and Space Administration) y el ministerio de economía, comercio e industria de Japón. A partir del diseño y delimitación de las cuencas y subcuencas que se encuentran en el área de estudio, se obtienen los parámetros geomorfológicos del territorio.

Con la cuenca delimitada, se procede a la identificación de los principales tipos de bosques que posee la zona. Se calculará de manera cualitativa la presencia de bosques de montaña basimontanos, montanos y altimontanos, los cuales comprenden la parte inferior, interior y superior de la Yunga peruana. En este caso, se utilizará el Mapa de Cobertura Vegetal elaborado por el Ministerio de Ambiente del Perú (2015) como guía para el estudio.

Luego, se construirá un modelo hidrológico de la cuenca con datos de precipitación y temperatura media mensual obtenidos de 8 estaciones meteorológicas. Para la evaluación, se aplicará el modelo GR2M que estima la escorrentía superficial a partir de datos de entrada de precipitación y evapotranspiración siguiendo el procedimiento indicado en la Figura 1.

A continuación, se cuantificará la tasa de erosión utilizando la Ecuación de Pérdida de Suelos (USLE) en función de parámetros de erodabilidad de lluvia, erodabilidad del suelo, topografía (en función de la longitud y pendientes de la cuenca), uso y manejo de la cobertura vegetal y prácticas de conservación del suelo, como se indica en la Figura 2. En este caso, el factor de prácticas de conservación, que representa las actividades realizadas sobre el terreno para reducir el impacto de la precipitación y la pérdida de cultivos, será considerado como una constante igual a 1. A partir de herramientas SIG, se obtendrán 4 mapas que representen los factores que intervienen en la ecuación de suelos. Al realizar álgebra de mapas se obtiene como respuesta final el mapa de la cuenca que expresa, de manera cuantitativa e ilustrativa, la tasa de erosión. Este procedimiento se realizará para los años 1990, 2005, 2014 y 2017.

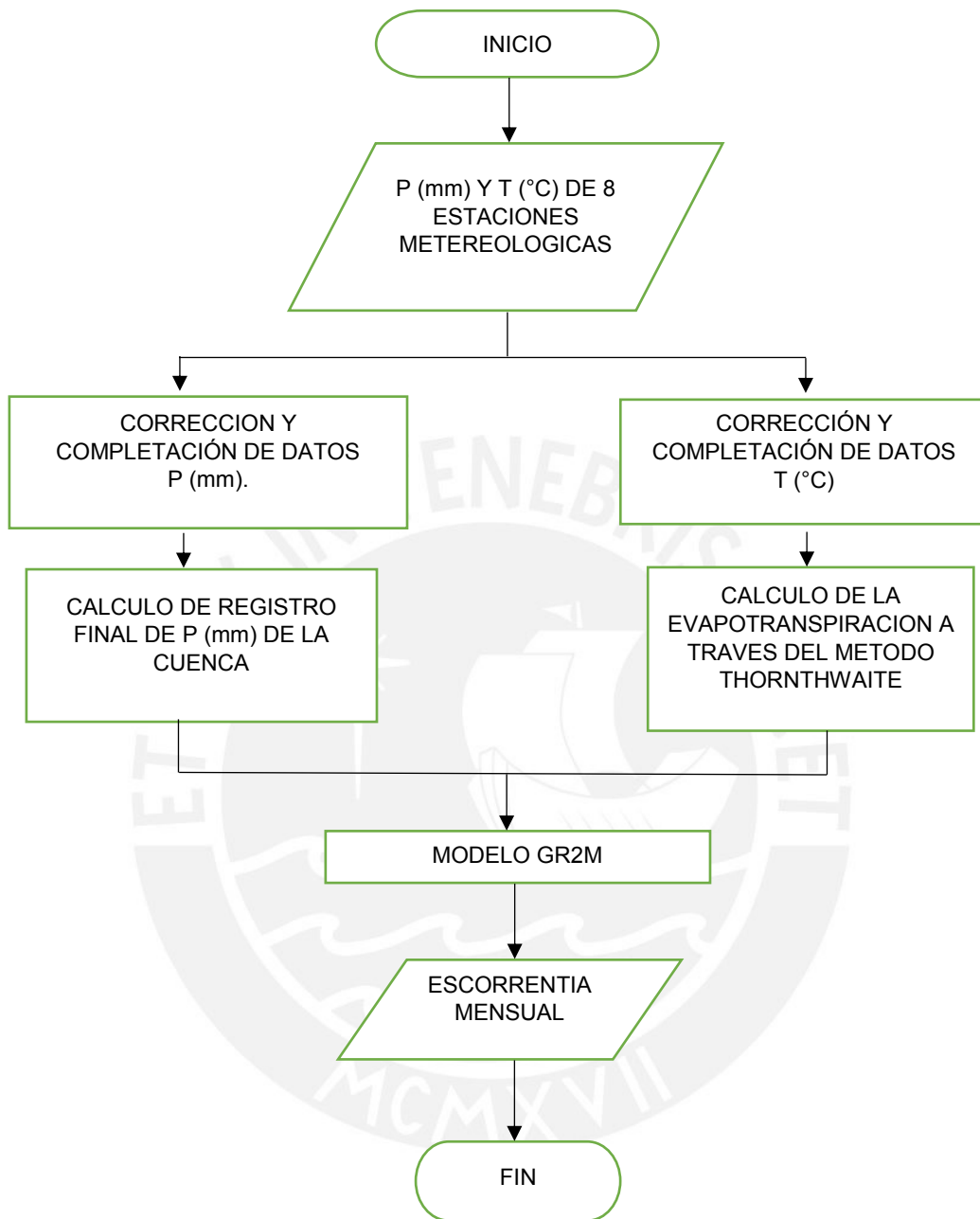
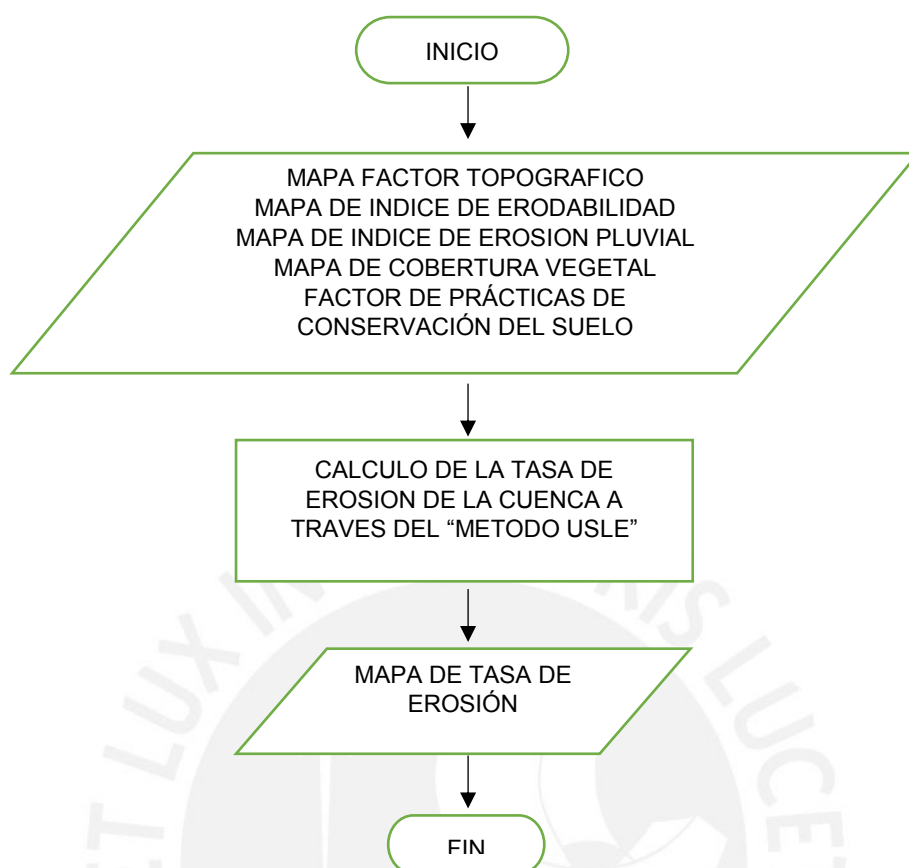


Figura 1. Diagrama de Flujo del procedimiento para el análisis Hidrológico. Fuente propia.



*Figura 2. Diagrama de Flujo del procedimiento para el cálculo de tasas de erosión.
Fuente propia.*

La Tabla 1 indica las fuentes utilizadas para la obtención de información. Los registros de precipitación y temperatura media mensual para las estaciones Huánuco, Carpish, Canchán, Chaglla y Tingo María se solicitaron al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y los registros para las estaciones Oyón, Yanahuanca y San Rafael se obtuvieron de la publicación “Evaluación de Recursos Hídricos en la cuenca de Huallaga” elaborada por la Autoridad Nacional del Agua (2015). De igual manera, los caudales utilizados para la calibración del modelo GR2M se obtuvieron de la publicación respectiva.

Para el análisis cualitativo de bosques se utilizó el mapa de cobertura vegetal publicado en el año 2015 por el MINAM para el análisis de bosques en la cuenca. Los mapas de características edáficas del territorio, utilizados para el cálculo de erodabilidad del suelo, como porcentaje de arena, limo, arcilla y contenido de carbón orgánico se obtuvieron del Mapa de Información Mundial de Suelo publicado en el año 2009 por la Organización

de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Asimismo, el modelo digital de elevación se obtuvo de la página de la NASA y las imágenes satelitales para el periodo de años evaluado se descargaron de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Tabla 1. Datos de entrada utilizados para estimar los factores que expresan la pérdida de suelo en la cuenca y el análisis hidrológico. Fuente: Elaboración Propia.

Datos de entrada	Fuente
Precipitación media mensual y temperatura media mensual (mm)	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología y Autoridad Nacional del Agua
Caudales mensuales en estación Tingo María (m ³ /s)	Autoridad Nacional del Agua
Mapa de contenido de arena, limo y arcilla	ISRIC- World Soil Information
Mapa de contenido de Carbón orgánico	ISRIC- World Soil Information
ASTER Digital Elevation Model	Japan Spice System and NASA
Mapa de cobertura vegetal	Ministerio del Ambiente, MINAM
Imágenes satelitales Landsat 5 Imágenes satelitales Landsat 7	Servicio Geológico de los Estados Unidos https://earthexplorer.usgs.gov/

4. CAPÍTULO IV: ANTECEDENTES

El Perú es uno de los países que posee gran biodiversidad de bosques en su territorio, debido a los diferentes climas al que está expuesto y la variabilidad de topografía que brinda la Cordillera de los Andes. Sin embargo, en muchas regiones no se conoce el estado actual de los ecosistemas, ya que no se regula ni controla la conservación de la vegetación arbórea, originando que los problemas de deforestación se intensifiquen a lo largo de la cuenca. Así, el Programa Nacional de Conservación de Bosques del MINAM registró una pérdida desde el año 2001 al 2016 de 1 974 209 hectáreas de bosques a nivel nacional (Gestión, 2018).

Marc Dourojeanni (2016), experto en temas ambientales, indicó, en una entrevista realizada por El Comercio, que el 90% de la deforestación de bosques se origina a partir de la agricultura informal, y el resto por la minería ilegal. Asimismo, resaltó la importancia de la inversión y planificación de programas protectores de bosques en todas las regiones de la Amazonía peruana; ya que, hasta el momento, las leyes impartidas no cumplen con el objetivo de proteger y cuidar los ecosistemas. A pesar de la existencia de programas como el Plan Nacional de Reforestación, resulta complicado recuperar la cantidad de bosques perdidos hasta el presente año, en especial los bosques de montaña que tardan entre 200 a 400 años en recuperarse de un evento de remoción total (Foster, 2001).

Las consecuencias del preocupante escenario se pueden observar en el departamento de Huánuco, en donde se ha registrado la deforestación de bosques de colina, bosques de montaña y bosques de terraza que representan el 31% del territorio (CEPLAN, 2015). Las principales causas de la degradación de bosques son, en las partes altas de la cuenca, la tala de árboles y quema de pastizales para usos poblacionales, y en las partes bajas, la expansión de terrenos agrícolas para la producción de productos de exportación como la hortensia (Ministerio del Ambiente, Grupo de Aves del Perú y Universidad Agraria de la Selva- Tingo María, s/f).

Los alarmantes efectos sobre el clima, hidrología y suelo han conducido a la realización de estudios que cuantifiquen los impactos y permitan tener un control y seguimiento de la situación actual de los bosques. Las principales variables analizadas son la escorrentía superficial y la tasa de erosión del suelo. Por ejemplo, la Universidad Nacional Agraria La Molina en convenio con el Programa Agro Rural del Ministerio de Agricultura (2011) realizó un estudio sobre la degradación del suelo a partir de la erosión hídrica en 22 microcuencas en 12 regiones de la sierra altoandina del Perú. La finalidad

del estudio consistió en la estimación de tasas de erosión y en la aplicación de zanjas de infiltración para su mitigación. La pérdida promedio del suelo obtenida fue de 45 ton/ha/año para terrenos con pendientes entre 18 al 40% y de 24.44 ton/ha/año para laderas tratadas con zanjas de infiltración, obteniendo una disminución del 80% del valor promedio (Vásquez y Tapia, 2011).

De igual manera, Huerta y Loli (2014) realizaron el estudio “Erosión Hídrica en la Cuenca alta del Río Moche” sobre la incidencia de la precipitación en la erosión y degradación del suelo, cuantificando la escorrentía superficial y la tasa de erosión con el método de Fournier. Los resultados obtenidos mostraron en la Microcuenca Pollo una pérdida de suelo por escorrentía igual a 33.4 t/ha/año y en la Microcuenca Huangamarca 7.29 t/ha/año, siendo la primera mucho más alta debido a la influencia de las fuertes pendientes que llegan hasta el 35% en comparación con las pendientes de Huangamarca que se encuentran entre 10 y 15% (Huerta y Loli, 2014). Debido a los resultados obtenidos, los autores concluyen que las características que incrementan la erosión potencial son la intensidad de lluvias, propiedades del suelo, topografía y cobertura vegetal, así como prácticas de manejo de erosión en la zona.

También, Llanos y Gonzáles (2015) realizaron la evaluación del impacto de la deforestación sobre la hidrología de los bosques y la pérdida de suelo, en especial la pérdida de carbón orgánico, en 8 subcuencas del río Alto Mayo ubicado en el departamento de San Martín. Para el análisis de tendencias hidrológicas aplicaron el método de Mann-Kendall y para el análisis de pérdida de suelo, la ecuación USLE. Los resultados demostraron que no existe relación directa entre las tendencias de series temporales de caudales y los porcentajes de área deforestada, debido a que la variación en la hidrología no solo depende del área removida de bosque sino también de características físicas y climatológicas que posee la cuenca, haciendo el panorama mucho más complejo. De igual modo, los resultados muestran que las cuencas que han sido expuestas a mayores problemas de deforestación son las que poseen tasas más altas de erosión hídrica.

5. CAPÍTULO V: ESTADO DEL ARTE

5.1. Conceptos de Hidrología de Bosques

5.1.1 Precipitación

Para describir el comportamiento hidrológico de los bosques andinos es importante categorizar los parámetros de entrada y salida de agua en el ecosistema. Se considera precipitación a toda formación de humedad que se origina en las nubes y llega a la superficie terrestre (Martínez y Navarro, 1996). En el caso de los bosques, es la principal fuente de entrada de agua, además de la humedad de niebla que logra interceptar la vegetación (Tobón, 2009). La precipitación se clasifica en 3 grupos dependiendo de los factores que originan el enfriamiento y cambio del vapor de agua a estado sólido o líquido dentro del sistema. La que es de nuestra consideración debido a que describe el origen de las lluvias en los bosques de montaña, es la precipitación convectiva. Esta se caracteriza por tener un desarrollo vertical y producirse en la tropósfera y parte de la estratósfera; produciendo lloviznas de alta intensidad, corta duración y logrando ser puntuales o localizadas (Fattorelli y Fernández, 2011).

Asimismo, es importante considerar que, dentro de los ecosistemas boscosos, gran porcentaje de la precipitación que se capta es a partir de la cobertura vegetal existente, ya que las gotas de lluvia son retenidas y absorbidas por las plantas. Por lo tanto, un parámetro adicional por mencionar es el de la precipitación neta que se describe como la fracción de la precipitación total que llega a la superficie del suelo, generalmente por el drenaje de agua desde el follaje y troncos de árboles, producto de la partición de la precipitación (Gómez-Tagle et. Al, 2015) y es la principal aportante de la esorrentía superficial.

La precipitación de los bosques de montaña aumenta al incrementar la altitud debido a que la humedad que llega al pie de las montañas se condensa y sube hasta la cumbre (Wagner, 2018). Este comportamiento se observa de manera más clara en los bosques andinos, ya que, en las partes más bajas de la cordillera oriental, en las cuencas amazónicas, los valores de precipitación oscilan entre los 2000 y 3000 mm anuales, mientras que los valores de precipitación en zonas expuestas a mayor nubosidad, es decir, a mayor elevación altitudinal, se encuentran cercanos a 8000 mm al año (Tobón, 2009, p.31).

5.1.2 Agua por interceptación de niebla

Los bosques andinos que presentan una alta capacidad de captación de agua por niebla son aquellos que se encuentran a una mayor elevación altitudinal. Esta nubosidad reduce los niveles de radiación solar hasta suprimir, total o parcialmente, los procesos de evapotranspiración (Wagner, 2018). El ingreso de esta fuente de agua se realiza a través del dosel de los árboles y de la vegetación que presenta el ecosistema que, durante épocas húmedas, retienen el agua actuando como esponjas y luego la liberan a la superficie del suelo por goteo (Tobón, 2009).

Debido al follaje que poseen los bosques montano tropicales y a la alta nubosidad que posee el clima, el porcentaje de agua interceptada de nubes por la vegetación en bosques tropicales oscila entre 5 y 20% (Brujinzeel, 2004). De igual manera, los bosques altoandinos ubicados en Latinoamérica que presentan gran cantidad de epífitas dentro de su biodiversidad, logran interceptar una cantidad de humedad equivalente de 5 al 35% de la precipitación anual (Tobón, 2009). Por ejemplo, el bosque Unchog ubicado en la parte alta de Carpish, dentro de la cuenca en estudio, posee bosques achaparrados que capturan el agua proveniente de la nubosidad de la zona por encontrarse a 3600 msnm; y derivan el recurso a las quebradas proporcionando agua a los bofedales y lagunas como Quillacocha y Bombon (Gonzáles, 2012), las cuales son utilizadas para fines poblacionales. De igual manera, el agua proveniente de la interceptación de niebla aporta considerablemente a las entradas de agua al sistema y contribuye con el ingreso de nutrientes solubles (Tobón, 2009).

5.1.3 Escorrentía superficial e infiltración

Los bosques andinos presentan características físicas e hidráulicas que les permite tener un mayor rendimiento hídrico, a comparación de otros bosques en el Perú. Las propiedades más relevantes son alta porosidad, alta capacidad de infiltración, gran capacidad de retención de humedad y la conductividad hidráulica que presenta su estructura de suelos (Doornbos, 2015). Además, la presencia de materia orgánica y grandes capas de musgos en su naturaleza les permite retener agua hasta seis veces su propio peso (Tobón, 2009).

La producción hídrica de los bosques, generalmente, se cuantifica a partir de parámetros de flujo superficial e infiltración de agua. La escorrentía superficial es aquella que se produce cuando se excede la capacidad de infiltración de agua en el suelo, originando

un flujo superficial sobre el terreno producto de las precipitaciones (Huerta y Loli, 2014). Asimismo, contribuye con el drenaje y el abastecimiento de cuerpos de agua que finalmente desembocan en los ríos y llegan a las partes bajas de la cuenca. Por otro lado, la infiltración es el proceso en el cual el agua ingresa hasta el interior de la tierra desde la superficie del suelo (Chavez, 1994).

El agua no se transporta de manera constante a través de la tierra, ya que la tasa de infiltración disminuye cuando los espacios vacíos de los poros capilares se van llenando (Chereque, 1989). Por ejemplo, en épocas secas las tasas de infiltración son altas ya que el suelo se encuentra libre de humedad, y va disminuyendo en épocas lluviosas porque se obtienen grandes grados de saturación del suelo (Fattorelli y Fernandez, 2011). Este fenómeno permite al agua alcanzar grandes profundidades hasta formar el agua subterránea. Los flujos subterráneos se obtienen a partir del drenaje vertical, en donde el agua alcanza los niveles freáticos del suelo y contribuye con la estabilización del caudal de quebradas y ríos, y drenaje horizontal, en donde el agua sale del ecosistema horas después del evento de precipitación (Tobón, 2009).

En este caso, los bosques andinos se caracterizan por tener una alta tasa de infiltración que les permite almacenar agua dentro del suelo y recargar los acuíferos existentes. De esta manera, poseen agua durante todas las estaciones del año, ya que, el suelo se conserva húmedo, en un estado cercano a la saturación. El agua que logra ingresar al suelo contribuye con el ciclo hidrológico y aporta flujos de agua que poseen poca toxicidad debido a la mayor cantidad de materia orgánica y minerales que poseen los bosques (Doornbos, 2015).

Sin embargo, para poder identificar el efecto de los procesos hidrológicos sobre el suelo, es importante conocer los procesos genéticos que forman su morfología. El suelo está dividido en estratos o capas, que se representan en horizontes según su profundidad, contenido de minerales, grado de intemperización, etc. Según la Guía para la Descripción de Suelos (FAO, 2009) se puede clasificar el suelo a partir de los siguientes horizontes, como se observa en la Figura 3.

El Horizonte A representa la capa superficial del suelo, que se caracteriza por su alto porcentaje de materia orgánica y su gran perturbación por actividades agrícolas o ganaderas. El Horizonte B se encuentra formado por material iluvial proveniente de las capas superficiales del suelo, generalmente transportados por el agua y con alto grado de alteración. Asimismo, el Horizonte C está conformado por materiales geológicos en estado no consolidado y rocas que han sufrido cambios en su composición, y,

finalmente, el Horizonte D se caracteriza por no tener alteraciones y estar conformado por la roca madre.

Debido al alcance del presente estudio, es de gran interés la capa superficial que pertenece al Horizonte A, ya que, permite el crecimiento de la vegetación y protege al suelo del impacto de fuerzas externas como las gotas de lluvia o fuertes corrientes de viento. Al remover esta capa, se pierden las propiedades iniciales del suelo y la escorrentía superficial aumenta, intensificando los procesos erosivos en las capas subsiguientes (García-Chevesich, 2015), originando la degradación parcial o total del suelo.

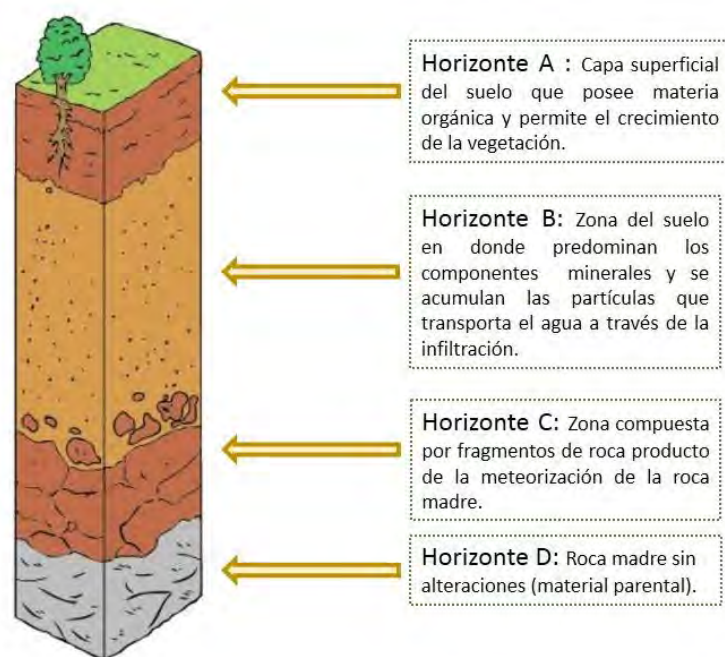


Figura 3. Ilustración y definición de horizontes que conforman el suelo. Fuente propia.

5.1.4 Evapotranspiración

El proceso de evapotranspiración consiste en la pérdida de agua por evaporación del suelo y transpiración de las plantas, al no ser utilizada dentro de la formación de tejidos de la cobertura vegetal (Martínez y Navarro, 1996). A pesar que el porcentaje de evapotranspiración es pequeño comparado con las altas tasas de absorción de agua en los bosques ubicados en las crestas de montaña (Wagner, 2018), se considera uno de los parámetros del ciclo hidrológico más importantes, ya que es el medio por el cual el agua precipitada regresa a la atmósfera (Chereque, 1989).

De igual manera, se ha identificado que la evapotranspiración posee una correlación indirecta con la altitud. Un estudio agroclimatológico realizado en los países de Colombia, Venezuela, Bolivia, Perú y Ecuador, demostró que la evapotranspiración disminuye 150 mm al año por cada 1000 m de altura, es decir, a mayor elevación altitudinal menor porcentaje de agua evapotranspirada (Tobón, 2009). También, se obtuvo un registro de la evapotranspiración de los bosques en el Perú y se observó que disminuyó 605 mm al año a una altura de 2500 msnm y 530 mm al año a una altitud promedio de 3200 msnm (Tobón, 2009), lo cual demuestra que a mayor nubosidad en bosques alto-andinos, el valor de agua evapotranspirada se reduce originando ecosistemas húmedos durante gran parte del año.

5.1.5 Efectos en la hidrología al cambiar el uso del suelo de los Bosques

Los bosques de montaña contribuyen con grandes aportes de agua (Brujinzeel, 2004) que se pierden al remover la vegetación original conformada por árboles de gran altura y raíces profundas, y son reemplazados por pastizales y cobertura vegetal de bajo porte y poca capacidad de retención de agua. Asimismo, el cambio de tipo de suelo y la desaparición de cobertura vegetal de los bosques intensifican los problemas de erosión especialmente en Latinoamérica en donde se practica la deforestación para uso agrícola y pastoreo.

Los principales efectos en la hidrología (Tobón, 2009) son los siguientes:

- Disminución de valores de evapotranspiración producto de la pérdida de cobertura vegetal, en este caso, principal medio por el cual el agua regresa a la atmósfera.
- Pérdida de capacidad de infiltración del suelo y conductividad hidráulica.
- Pérdida de capacidad de retención de agua en épocas de avenida para ser utilizadas en épocas de escasez, originando un desequilibrio en la producción hídrica anual y estacional de las cuencas.
- Disminución de cantidad de precipitación interceptada por la vegetación existente.
- Cambios en régimen hidrológico como aumento de escorrentía superficial solo en épocas de avenidas, y sequía en épocas del año con escasos eventos de precipitación.

5.2. Conceptos de Erosión de Suelos

5.2.1 Definición de Erosión

Según Garcia-Chevesich (2015) la erosión es el proceso en el cual el suelo se degrada producto de agentes hídricos y eólicos y puede ocurrir de manera natural o de origen antrópico. De igual manera, la erosión es considerada como un proceso en el cual el paisaje se transforma debido a la reubicación, remoción o desaparición de recursos naturales que lo conforman (Begueria, 2005). En la mayoría de casos se llega a perder las características del suelo en su totalidad y las condiciones necesarias para el sostenimiento de vegetación.

La erosión hídrica es un proceso que origina impactos negativos como el transporte de sedimentos que contienen nutrientes y contaminantes (Garcia-Chevesich, 2015). Generalmente, los suelos que se encuentran completamente descubiertos sin cobertura vegetal son aquellos que mantienen las tasas más altas de pérdida de suelo; por el contrario, aquellos ecosistemas que no han sido intervenidos se conservan y no producen valores significativos de tasas de erosión (Suarez, 2001).

5.2.2 Erosión Hídrica

La erosión hídrica se clasifica según los procesos que originan el desprendimiento de las partículas, como la erosión de impacto y laminar, y aquellos que producen la acumulación del material desprendido, como la erosión en riles y cárcavas (Rosas, 2016).

La erosión se produce cuando una fuerza externa, como el impacto de las gotas de lluvia, interviene en el suelo y, debido a la energía potencial generada, transporta las partículas desprendidas a lo largo de la cuenca (Escobar et. Al, 2002). El movimiento del material se realiza a partir de la escorrentía superficial a una velocidad determinada hasta finalmente depositarse en el suelo. La Figura 4 muestra de manera resumida el proceso de erosión hídrica.

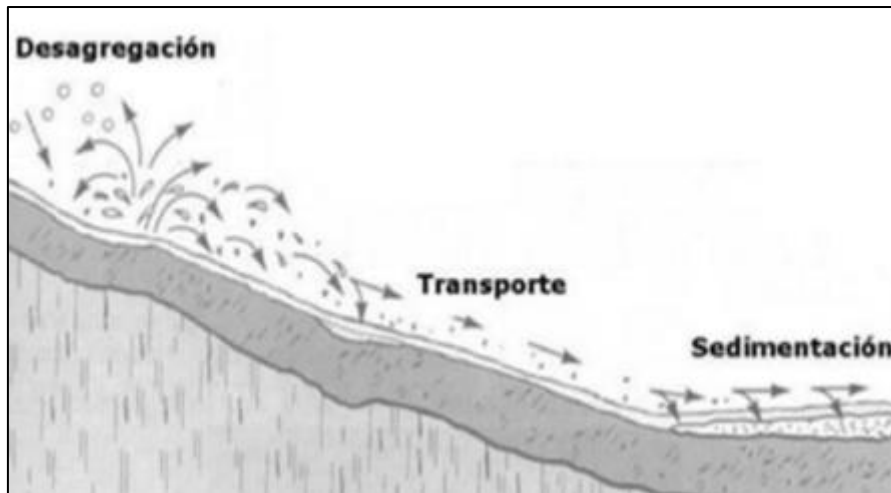


Figura 4. Procesos de erosión hídrica representado en desprendimiento, transporte y depósito de material. Fuente: SENAMHI, 2017, p.5.



5.2.2.1 Tipos de erosión hídrica

Erosión de Impacto

La erosión de impacto se origina por la caída de gotas de lluvia durante eventos de precipitación que golpean y degradan superficies de suelo que no se encuentran protegidas por vegetación (Suarez, 2001). Es considerada la etapa más importante y representativa de la erosión hídrica por los efectos devastadores que posee sobre el terreno (Tayupanta, 1993). Asimismo, origina que la estructura inicial del suelo se rompa y las partículas queden susceptibles a ser transportadas, de manera consecuente, por flujos superficiales. El efecto de las gotas de lluvia se puede cuantificar a partir de la intensidad, duración y tipo de tormenta ya que poseen valores variables de velocidad y energía cinética (Garcia-Chevesich, 2015).

Erosión laminar

La erosión laminar se origina al exceder la tasa de infiltración del suelo que produce el aumento de escorrentía superficial. El flujo se expresa como una delgada capa de agua que se transporta sobre el suelo (Garcia-Chevesich, 2015) que, durante un evento de precipitación, al combinarse con las lluvias, ocasiona que la escorrentía se transporte de manera turbulenta erosionando con mayor intensidad el suelo (Morgan, 2005). Este efecto se observa en zonas deforestadas y en terrenos que no poseen cobertura vegetal, así como superficies y taludes empinados (Tayupanta, 1993).

5.2.3 Principales factores que afectan a la erosión

5.2.3.1 Clima

Como se mencionó en la descripción de erosión por impacto, la cantidad de agua precipitada (mm) y la intensidad de la tormenta (mm/hr) definen el impacto erosivo de la lluvia sobre el suelo (UNESCO, 2010). Por ejemplo, en el caso de lluvias leves, no se excederá la capacidad de infiltración del suelo y el diámetro de las gotas de lluvia no será significativo para lograr el proceso de erosión por impacto (Garcia-Chevesich, 2015). Por el contrario, para el caso de lluvias intensas, con grandes periodos de duración, se originan altas tasa de flujo superficial que proceden con grandes magnitudes de pérdida de suelo.

Una consideración importante para el análisis de procesos erosivos es el tiempo transcurrido entre una tormenta y otra, y las condiciones iniciales de humedad del suelo,

ya que, si se encuentra en condiciones de saturación, se producirá mayor escurrimiento superficial (Martínez y Navarro, 1996).

5.2.3.2 Vegetación

El principal aspecto por considerar dentro de los bosques es la densidad y tipo de cobertura vegetal. Se conoce que las hojas de los árboles permiten la disminución de la velocidad de caída de las gotas de lluvia, disminuyendo la energía cinética y evitando el impacto de ellas sobre el suelo (Tayupanta, 1993). Asimismo, las raíces de los árboles poseen un efecto subterráneo y superficial ya que contribuyen, no solo con la absorción del agua del suelo, sino también con el aumento de la rugosidad (Marañón et Al., 2011). De igual manera, brindan un anclaje al suelo lo cual les permite mantenerse firmes ante la erosión laminar o movimientos de tierra (Suarez, 2011).

Al igual que la propia vegetación que poseen las cuencas de estudio, la hojarasca que se encuentra en su capa superficial de suelo, formada a partir de ramas y hojas provenientes de los árboles, también contribuyen con la protección del suelo ante procesos erosivos ya que evitan las altas velocidad con la cual se transporta el escurrimiento superficial y evitan el contacto directo con la precipitación (García-Chevesich, 2015).

5.2.3.3 Tipo de suelo

La erosividad del suelo depende de diferentes componentes. El primero es la clase textural ya que dependiendo del tamaño de la partícula de material el suelo será más o menos vulnerable a procesos de erosión (UNESCO, 2010). Asimismo, el porcentaje de materia orgánica mejora la cohesividad del suelo e incrementa la capacidad de retención de agua (Morgan, 2005); y la estructura y permeabilidad del suelo definen la capacidad de infiltración, ya que aquellos que poseen estructuras masivas poseen menores tasas de infiltración y son más fáciles de erosionar que aquellos con mayor porcentaje de material granular (García-Chevesich, 2015).

5.2.3.4 Topografía

La influencia de la topografía del terreno respecto a la erosión del suelo constituye en la longitud e inclinación que poseen los taludes dentro de la cuenca. Si el terreno se considera accidentado con pendientes altas y poca vegetación, será más susceptible a procesos de erosión laminar. De igual manera, la longitud de las pendientes determinará la cantidad de sedimentos transportados y depositados durante un evento de precipitación (García-Chevesich, 2015).

5.2.4 Pérdida de suelo debido a la erosión en bosques andinos

La erosión es un fenómeno que se presenta en los ecosistemas boscosos de manera natural, especialmente en aquellos que se ubican en los andes, debido a los altos y prolongados eventos torrenciales, así como las elevadas pendientes debido a la topografía. Por ejemplo, en las partes medias de la Intercuenca Alto Huallaga, las pendientes alcanzan de 12 a 15% a una altitud de 2300 a 3500 m.s.n.m (Gobierno Regional de Huánuco, 2016) originando que sean zonas con valores altos de pérdida de suelos.

Por otro lado, la erosión también se origina por causas antrópicas debido al mal uso del suelo que otorgan las localidades cercanas a los bosques de montaña. Los bosques no presentan las condiciones óptimas para desarrollar actividades agrícolas, industriales, mineras o ganaderas; sin embargo, los pobladores continúan realizando dichas actividades en los bosques removiendo gran cantidad de vegetación. Luego del proceso de deforestación, los bosques quedan en condiciones de abandono aumentando la vulnerabilidad del suelo a procesos de erosión e incrementando las tasas de sedimento en los ríos, que muchas veces contribuyen con la mala calidad del agua para consumo potable.

Asimismo, es complicado que el suelo intervenido por procesos de deforestación recupere sus condiciones iniciales; por ejemplo, en un estudio realizado en la parte central andina del Perú, los valores de tasa de erosión incrementaron a lo largo de los años en terrenos degradados generando altas tasas de sedimentos, debido a que estos se encuentran completamente desnudos y no son capaces de recuperar su cobertura vegetal inicial (Tobón, 2009).

5.3. Sistema de Información Geográfica en los Bosques

Actualmente, el estudio de cuencas hidrográficas y la evaluación de su productividad hídrica, así como el correcto manejo de territorios que poseen gran biodiversidad, como los bosques peruanos, se realiza a partir de sistemas de información geográfica (SIG). Se define a un SIG como el conjunto de herramientas que permite organizar, almacenar, analizar y modelar una gran base de datos de información espacial y obtener resultados que son implementados en la vida cotidiana (Mena, 2007). Asimismo, para la aplicación de un SIG se consideran no solo aspectos geográficos, sino también componentes sociales y ambientales (Olaya, 2011).

La importancia de utilizar tecnología SIG para el estudio de cuencas y los elementos que la integran radica en su capacidad de analizar grandes cantidades de información espacial y temporal que estén geográficamente referenciados (Begueria, 2005), especialmente cuando se desea cuantificar las tasas de erosión del suelo que dependen de factores climáticos y de la variación de cobertura vegetal a lo largo de un periodo de tiempo. De igual manera, se debe considerar la escala que posee la estructura espacial, es decir, si se realiza la evaluación a nivel local o regional, ya que al disminuir la superficie de área sobre la cual se aplican los procedimientos y métodos, se necesita mayor cantidad y precisión de información.

La aplicación de sistemas de información geográfica sobre recursos forestales radica en diferentes áreas temáticas según Sanchez et Al. (1999), las cuales son: reconocimiento y gestión de recursos naturales, ordenamiento del territorio, aprovechamiento de superficies boscosas y gestión del paisaje, flora y fauna. Estas se enfocan en predecir el comportamiento futuro de los ecosistemas a partir de información satelital actual, calculan la vulnerabilidad de un bosque a ser deforestado o intervenido para realizar actividades agrícolas o ganaderas, cuantifica los impactos ambientales ocasionados por actividades antrópicas y las medidas de reforestación que se necesitan aplicar para mitigar los efectos.

Las herramientas SIG para el estudio de bosques, integran bases de datos espaciales que representan diferentes fenómenos naturales para obtener resultados que permitan un mejor manejo y valoración de recursos. La adquisición de datos se realiza a partir de estudios en campo y herramientas de teledetección como imágenes satelitales.

La teledetección o percepción remota se define como la obtención de datos y características de un objeto a partir de un dispositivo que no posee contacto directo con

la tierra (Olaya, 2011), el cual emite fuentes de información expresada en imágenes satelitales en las cuales es posible discriminar la naturaleza de los objetos y clasificarlos. Esto es posible gracias a la relación sensor-cobertura, es decir, radiación electromagnética expresada en emisión y reflexión de flujos de energía sobre la tierra que emiten los sensores montados en satélites espaciales (Martínez, 2005).

Su gran importancia se debe a la facilidad que brindan los datos espaciales al realizar estudios de cuencas a nivel regional, en los cuales, las mediciones realizadas en campo durante la práctica no son representativas de todo el territorio. Por ejemplo, al evaluar la relación que existe entre los cambios de uso de suelo, la escorrentía y las tasas de erosión, se necesita conocer la dinámica de los procesos naturales que intervienen ya que existen variaciones espaciotemporales (Begueria, 2005).



6. CAPÍTULO XI: INFORMACIÓN BÁSICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

6.1. Aspectos generales

El río Huallaga, principal afluente del río Marañón, nace en las alturas de Cerro de Pasco y posee una extensión de 1138 km, recorriendo los departamentos de Pasco, Huánuco, San Martín y Loreto (SENAMHI, 2014). Debido a su gran extensión, la Autoridad Administrativa del Agua VIII Huallaga es el órgano encargado de dirigir la gestión de recursos hídricos de la cuenca, según las respectivas unidades hidrográficas mostradas en la Figura 5.

UNIDADES HIDROGRÁFICAS		
CÓDIGO	UNIDAD HIDROGRÁFICA	ÁREA km ²
49846	Biabo	7 111,02
49848	Huayabamba	13 801,00
49844	Mayo	9 722,47
49842	Paranapura	3 965,62
49849	Intercuenca Alto Huallaga	30 275,87
49841	Intercuenca Bajo Huallga	8 416,68
49847	Intercuenca Medio Alto Huallaga	5 064,06
49843	Intercuenca Medio Bajo Huallaga	8 926,21
49845	Intercuenca Medio Huallaga	2 133,30

Figura 5. Unidades hidrográficas de la Cuenca del Río Huallaga. Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2013, p.6

La cuenca, a lo largo de toda su longitud, muestra terrenos llanos, terrenos con pendientes medias y muy escarpados que le otorgan características geomorfológicas variadas, como montañas muy empinadas en las partes altas de la cuenca pertenecientes a las provincias de Cerro de Pasco, Ambo y Huánuco; y zonas sin fuertes desniveles como planicies y fondos de valles en la zona del Alto Amazonas. En la Figura 6 podemos observar el perfil del cauce del Río Huallaga, según su cambio de altitud (m.s.n.m) a lo largo de toda la longitud de la cuenca.

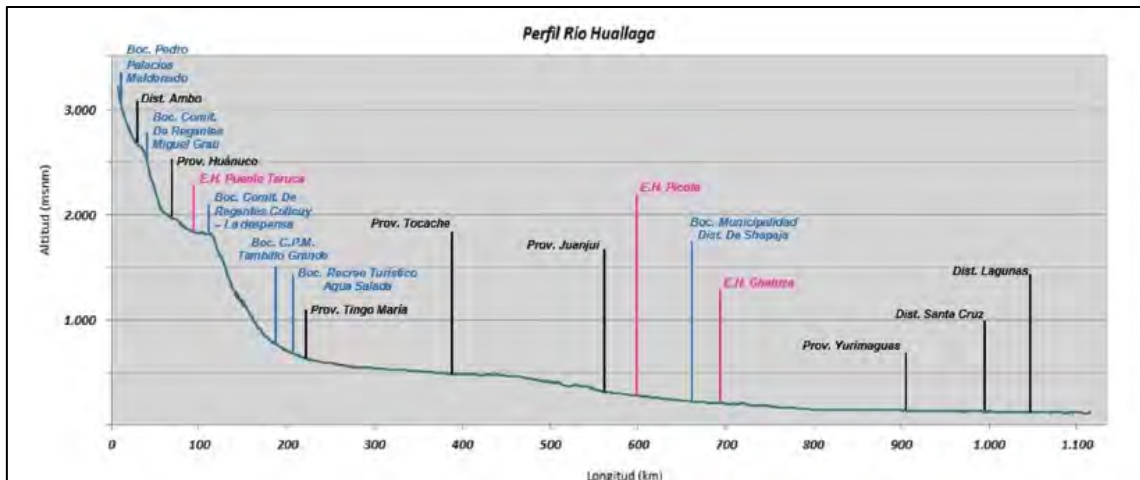


Figura 6. Perfil del cauce del Río Huallaga. Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2015, p.68

Según el Mapa de Capacidad de Uso Mayor del Perú publicado por la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) del Ministerio del Ambiente, el territorio está clasificado en su mayor parte como de uso potencial para tierras de protección de pastos, tierra de protección forestal y cultivos, debido a limitaciones por erosión local, características edáficas del suelo y el clima, constituyendo el 65.1% de la superficie total de la cuenca (ANA, 2015).

El uso de suelo dentro de la cuenca depende del tipo de cobertura vegetal, el cual varía desde pajonales y matorrales arbustivos en las zonas altoandinas hasta bosques de colinas y montañas en la selva y parte baja. La cuenca forma parte de la franja de bosques húmedos de la Cordillera Oriental de los Andes (Salinas, 2005) brindando características poco favorables al suelo para actividades agrícolas. Ya que los suelos son húmedos, insalubres y poseen déficit de nutrientes necesarios para la conservación de cultivos, solo el 1% de la superficie total está destinada a la agricultura (ANA, 2015).

6.1.1 Caracterización de la zona de estudio Intercuenca Alto Huallaga hasta la ciudad de Tingo María

El tramo de la intercuenca Alto Huallaga que se analizará dentro de la siguiente investigación comprende el departamento de Pasco, con las provincias de Cerro de Pasco y Daniel Alcides Carrión; y el departamento de Huánuco con las provincias de Ambo, Huánuco, Pachitea, Yarowilca, Dos de Mayo, Huamalies, Huacaybamba, Marañón, Leoncio Prado y Puerto Inca como se observa en la Figura 7.

La cuenca posee un área de 12309.14 km² y un perímetro de 868.23 km que se encuentran delimitados por el paso del Río Huallaga de Sur a Norte. El río posee un recorrido inicial de Oeste a Este aumentando su cauce en la ciudad de Huánuco. Luego, debido a las altas pendientes y al relieve de la zona, disminuye su sección hasta atravesar la región de Carpish, en donde ingresa a la región de selva baja formando el valle de Tingo María. La máxima elevación del territorio es de 5500 msnm y la mínima 750 msnm en las partes más bajas de la cuenca, ingresando a la ceja de selva. Posee un relieve accidentado con zonas montañosas, glaciares y valles alcanzando una pendiente promedio del 12% en las partes más altas de la cuenca y de 0.2% en las partes más bajas (Gobierno Regional de Huánuco, 2016).

La intercuenca Alto Huallaga se caracteriza por poseer variables ecosistemas que pertenecen a la región Sierra altoandina y a la Selva, especialmente el departamento de Huánuco en donde se encuentra la mayor variabilidad de cobertura vegetal. Según el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal elaborado por el MINAM en el año 2015, gran porcentaje de la superficie de la cuenca está comprendida por bosques de montaña como se observa en la Figura 8. Los bosques identificados según el mapa del MINAM son los bosques de montaña basimontanos, bosques de montaña altimontanos y bosques montanos, como se muestra en la Tabla 2. Asimismo, se describen las principales características de los bosques, las cuales, junto con sus condiciones ecológicas, permiten brindar servicios ambientales como conservación del suelo frente a problemas de erosión, ya que poseen una delgada capa de suelo superficial, y regulación del agua, ya que debido a su ubicación altitudinal están expuestos a altas pluviosidades (MINAM, 2015).

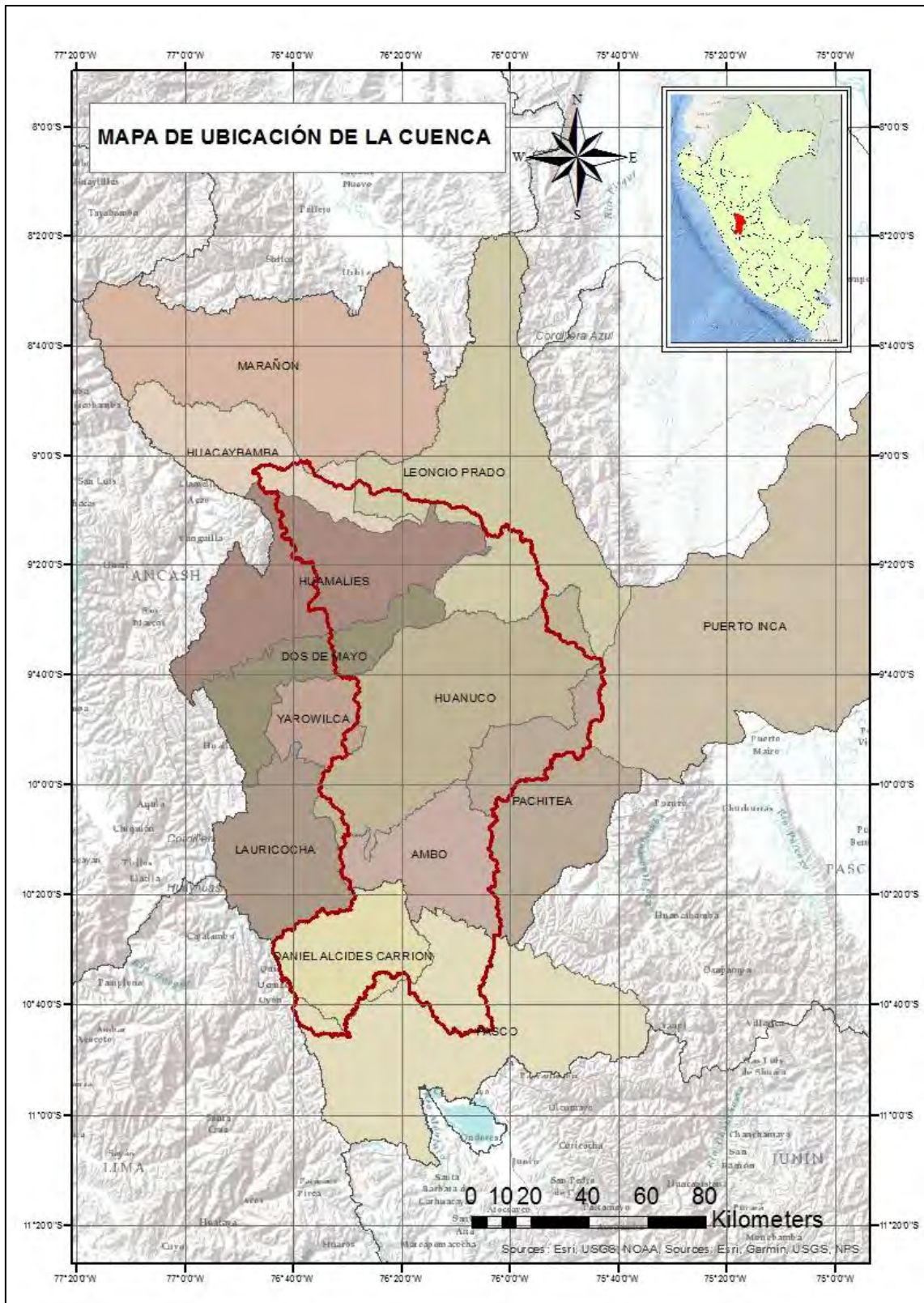


Figura 7. Ubicación de la cuenca de estudio. Fuente propia.

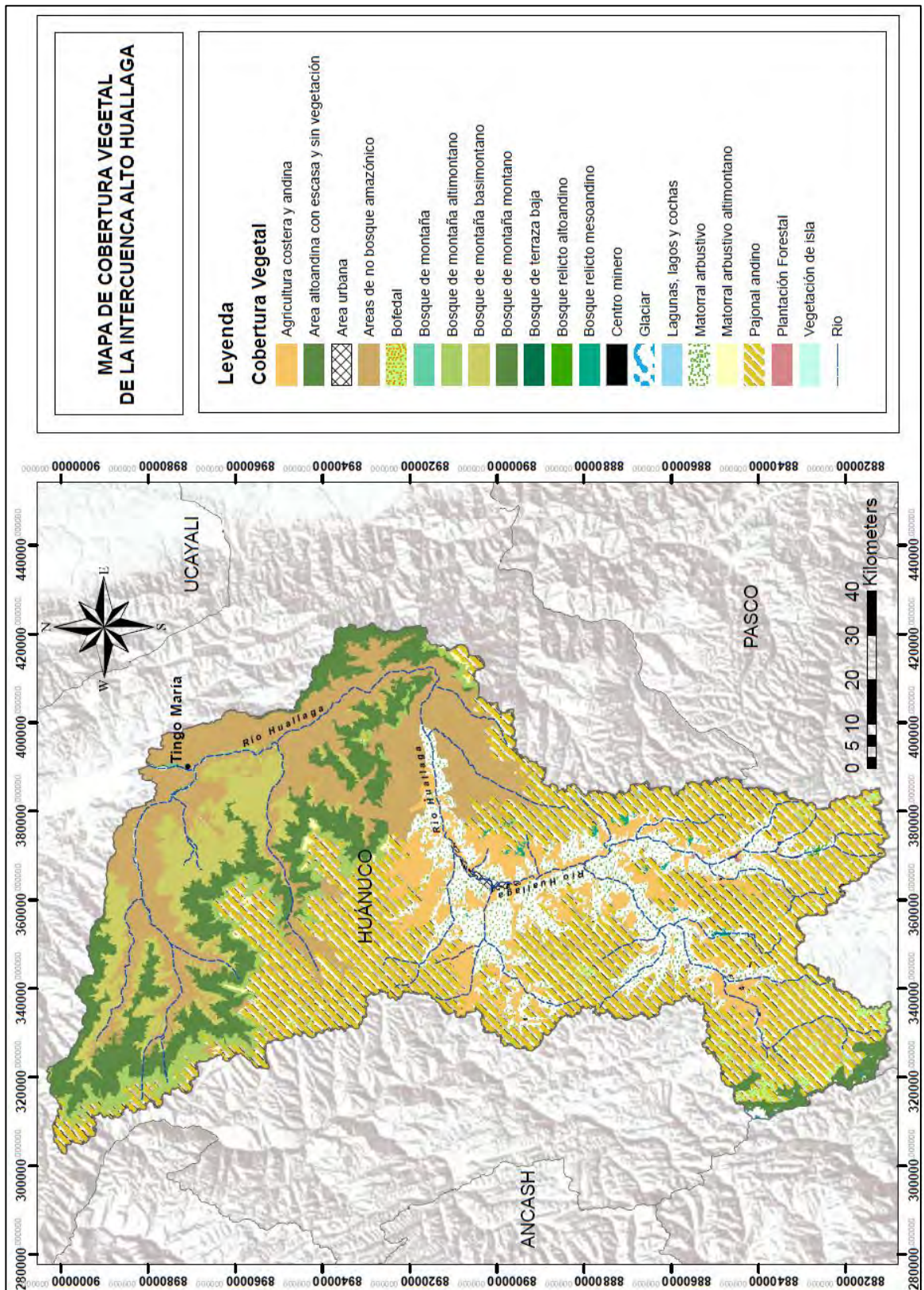


Figura 8. Mapa de Cobertura Vegetal de la cuenca. Fuente Propia.

BOSQUE	UBICACIÓN	ALTITUD	PENDIENTE	COBERTURA VEGETAL
Bosque de montaña basimontano (Bm-ba)	Cordillera Oriental, parte inferior región Yunga	800 a 2000 m.s.n.m.	25 - 50%	Epífitas, árboles con alturas máximas de hasta 30 m.
Bosque de montaña altimontano (Bm-al)	Cordillera Oriental, parte superior región Yunga	sobre los 3000 m.s.n.m.	50% a más	Pajonal andino de puna o páramo
Bosque de montaña montano (Bm-mo)	Cordillera oriental, región Yunga	2000 a 3000 m.s.n.m.	50% a más	Comunidades arbóreas de hasta 20 a 25 m en nivel inferior, y 10 a 15 m en niveles superiores.

Tabla 2. Bosques de Montaña en cuenca de estudio. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2015, p.44-52

La gran biodiversidad de bosques, a lo largo de los años, ha sido intervenida por actividades humanas como agricultura, ganadería, construcción de infraestructura, minería, etc. originando altas tasas de deforestación. Asimismo, la falta de organismos reguladores dentro de la región de Huánuco originó que grandes superficies de bosques de neblina, con variabilidad de flora y fauna se encuentren en estado de emergencia. Por ejemplo, en el año 2011 el Ministerio de Ambiente declaró área protegida al Área de Conservación Privada de San Marcos, ubicada en el distrito de Umariá, provincia de Pachitea, con el objetivo de proteger a los bosques de la tala y quema para producción agropecuaria (SERNANP, s/f).

Como se puede observar en la Figura 9, el Programa Nacional de Conservación de Bosques creado por el Ministerio del Ambiente ha logrado cuantificar la cantidad de zonas boscosas desde el año 2001 al 2016, de los cuales se ha observado una pérdida de 272 245 ha de bosques. Asimismo, la Figura 10 muestra la cantidad de superficies boscosas perdidas anualmente observando que en el año 2016 se han perdido 18 198 ha de bosques. De igual manera, la Figura 11 muestra la concentración de pérdida de bosque en la región de manera cualitativa.

A pesar de las diferentes iniciativas tomadas para disminuir la deforestación y brindar protección a los bosques, son necesarios mayores estudios que cuantifiquen el impacto que origina la remoción de zonas boscosas, como la perturbación de las características reguladoras hídricas del suelo y su degradación, medidas en escorrentía superficial y tasas de erosión.

BOSQUE - HUANUCO

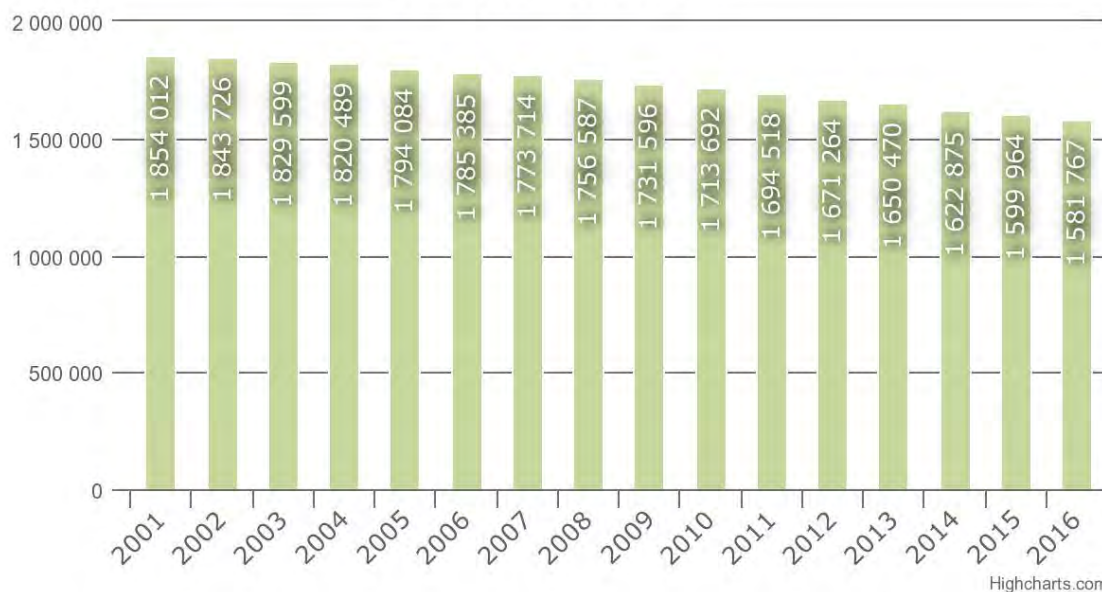


Figura 9. Bosques en el departamento de Huánuco. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2018. Recuperado de <http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php>

PÉRDIDA DE BOSQUE - HUANUCO

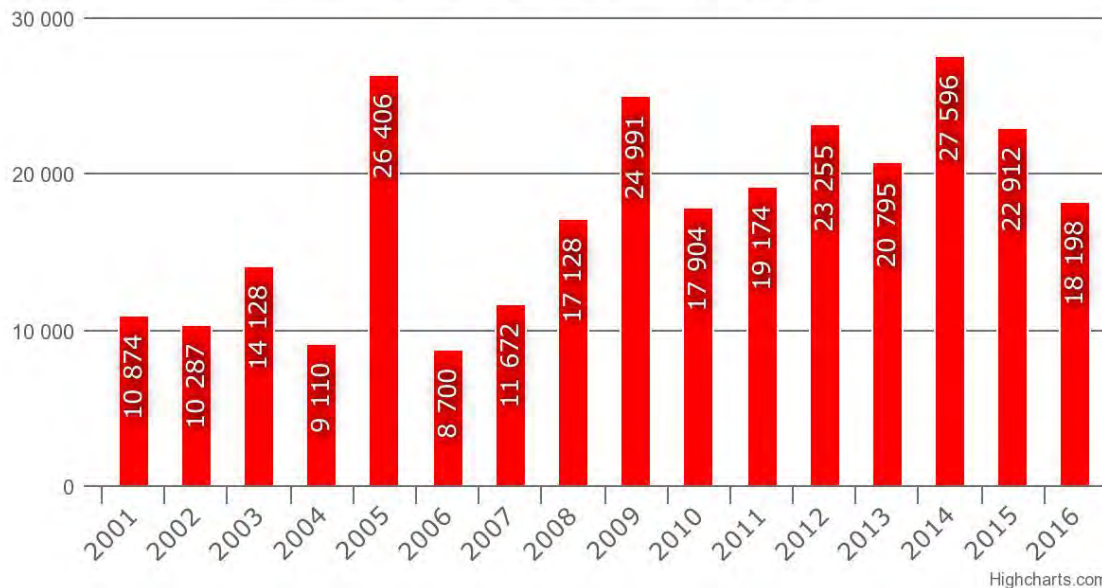


Figura 10. Pérdida de Bosques en el departamento de Huánuco. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2018. Recuperado de <http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php>

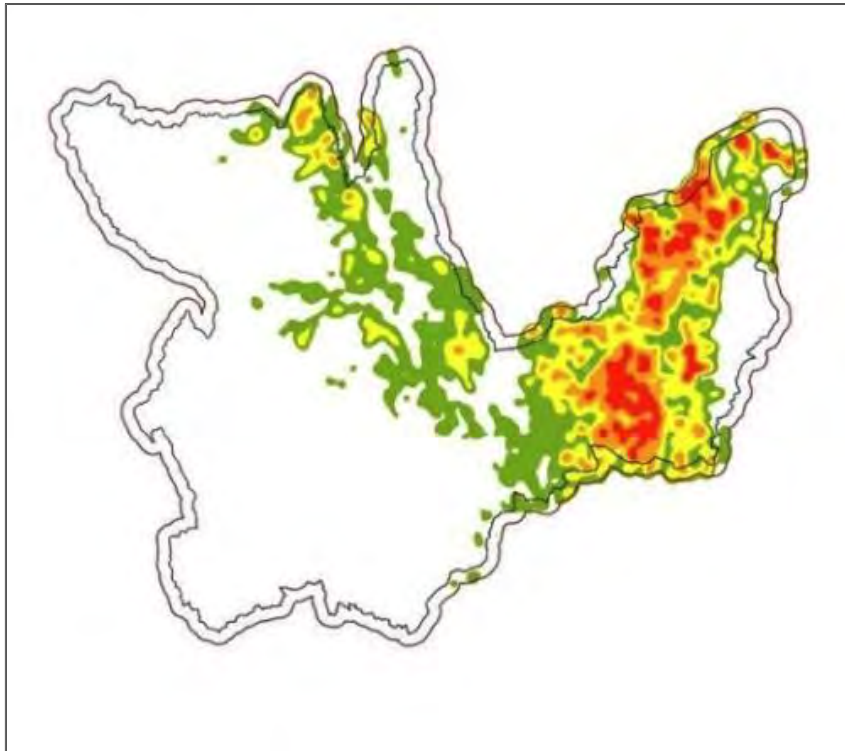


Figura 11. Concentración de pérdida de bosques en la región Huánuco. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2018. Recuperado de <http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php>



7. CAPÍTULO VII: IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA

7.1. Métodos de estimación de la erosión en bosques - Método USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos elaborada por Smith y Wischmeier (1978), nos permite cuantificar el potencial erosivo de una cuenca en estudio considerando procesos de erosión laminar y erosión en surcos en un área afectada por cambios de uso de suelo. El cálculo se realiza mediante la Ecuación 1.1.

$$A = R.K.LS.C.P \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde,

- A = Pérdida de suelo expresado en tasa de erosión anual (t/ha/año).
- R = Factor de erodabilidad de la precipitación que cuantifica la fuerza erosiva de las lluvias (MJ mm /h ha/ año).
- K = Factor de erodabilidad del suelo (t ha h/ MJ mm).
- LS = Representa el factor topográfico de la cuenca, en base a la longitud y pendiente de la ladera. El factor L muestra la relación entre una longitud determinada y su respectiva pérdida de suelo; y el factor S muestra la respectiva erodabilidad del suelo dependiendo de la pendiente del terreno (adimensional).
- C = Factor de manejo y cobertura vegetal muestra la relación entre un terreno con cultivos y uno con pérdida de vegetación, en base al tipo de uso de suelo (adimensional).
- P = Factor de trabajos de control y pretensión de la erosión, indica las prácticas de conservación realizadas en el territorio para disminuir el efecto erosivo y su correspondiente pérdida de suelo (adimensional).

Las variables descritas que dependen de las características de la cuenca y son constantes en el tiempo, son el factor K, L y S; y las variables dinámicas que varían de manera sensible en el tiempo son R, C y P (Rosas, 2016).

7.1.1 Índice de erosión pluvial R

La agresión erosiva producida por las fuertes lluvias en la Intercuenca Alto Huallaga serán calculadas mediante el método de Fournier, para regiones en donde existe falta de información pluviométrica (Rosas, 2016) debido a herramientas de toma de datos, determinada por la Ecuación 2.

$$F = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{p} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde,

p_i = Precipitación promedio mensual en la cuenca (mm)

p = Precipitación promedio anual (mm)

Los valores de precipitación dentro de la cuenca se obtuvieron de las estaciones meteorológicas mostradas en la Figura 12. Para las estaciones Huánuco, Canchán, Carpish, Tingo María y Chaglla fueron solicitados al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), y para las estaciones Oyón, San Rafael y Yanahuanca fueron adquiridas del Informe Final de la Evaluación de Recursos Hídricos de la Cuenca del Huallaga publicado por la ANA (2015). No todas las estaciones, como se muestra en la Tabla 3, contenían el número de años requerido; por lo tanto, se realizó la completación y extensión de datos para lograr un rango de parámetros entre los años 1980 – 2018, evaluando un total de 38 años.

Tabla 3. Estaciones meteorológicas dentro de la cuenca. Fuente propia.

LONGITUD	LATITUD	ELEVACION	ESTACION	INTERVALO	N° AÑOS
76° 46' 7.33"	10° 40' 3.69"	3667	OYON	1965 - 2018	53
76° 14' 54.8"	9° 57' 7.24"	1947	HUANUCO	1980 - 2018	38
76° 18' 34.62"	9° 55' 15.43"	1986	CANCHAN	1988 – 2018	30
76° 5' 1"	9° 40' 1"	1950	CARPISH	1994 – 2018	24
76°10' 35.47"	10° 19' 45.27"	2722	SAN RAFAEL	1966 – 2018	52
76° 0' 1.59"	9° 18' 30.6"	660	TINGO MARIA	1965 – 2018	53
75° 54' 1"	9° 50' 1"	2800	CHAGLLA	1998 – 2018	20
76° 30' 46.26"	10° 29' 22.57"	3150	YANAHUANCA	1978 - 2018	40

Luego, para poder hallar el factor de erodabilidad de la lluvia, aplicamos la ecuación de Arnoldus utilizada para zonas en donde existen grandes eventos de precipitación, representada por la Ecuación 1.3.

$$R_A = 0.264 F^{1.5} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

En la Tabla 4 podemos observar los valores del factor F y el factor R correspondiente a la cuenca en estudio con su respectiva ubicación geográfica. El método de interpolación utilizado para el análisis de toda la superficie de la cuenca fue la herramienta Kriging (Lavado et al., 2011), ya que realiza un análisis estadístico de datos considerando el modelado de un variograma y la varianza de la superficie (Oliver, 1990).

Tabla 4. Factor F y R para cada registro de precipitación en las 5 estaciones de estudio. Fuente propia.

ID	ESTACION	X	Y	Factor F	Factor R
457	Canchán	356425.5	8903044.49	72.97	164.57
454	Carpish	381115.42	8931222.15	243.70	1004.36
455	Chaglla	401279.97	8912851.49	147.38	472.36
404	Huánuco	363133.64	8899635.57	67.34	145.89
468	Tingo María	390126.89	8970885.46	381.11	1964.15
541	Oyón	306760.23	8820325.43	97.12	252.69
552	San Rafael	371953.82	8858788.4	106.99	292.16
475	Yanahuanca	334960.33	8839861.45	111.24	309.74

A partir de este factor, se elabora el mapa de agresividad pluvial, en donde se podrá observar las zonas con mayor vulnerabilidad a procesos erosivos debido a sus altas tasas de precipitación.

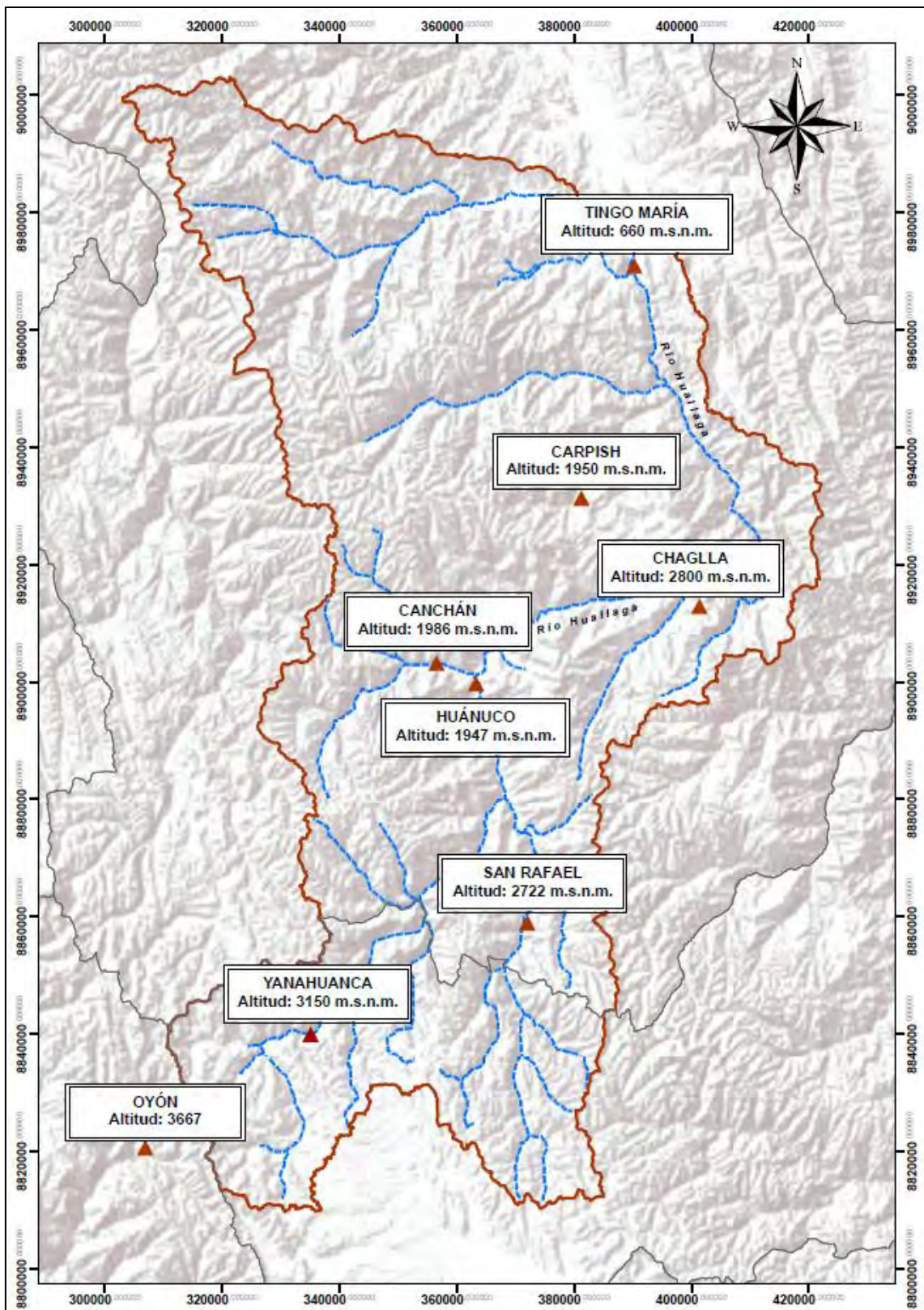


Figura 12. Mapa de estaciones meteorológicas. Fuente propia.

7.1.2 Índice de erodabilidad del suelo K

El factor de erodabilidad del suelo será calculada a partir de una ecuación de regresión (Suarez, 2001) que considera las características texturales del suelo y el contenido de materia orgánica que posee, representada por la Ecuación 1.4.

$$K = 10^{-2}[2.1 \times 10^{-4}(12 - OM) M^{1.14} + 3.25(s - 2) + 2.5(p - 3)]/7.5 \quad (\text{Ec. 1.4})$$

La variable M es un factor que representa la textura del suelo en base a su contenido de partículas de diámetro desde 0.002 a 2mm, es decir, depende del porcentaje de arcilla, limo y arena fina que contenga. El valor de M se cuantifica de la siguiente manera por la Ecuación 1.5.

$$M = [100 - \%arcilla] [\%limo + \%arena\ muy\ fina] \quad (\text{Ec.1.5})$$

La variable OM representa la cantidad de materia orgánica en los 15 a 20 cm de superficie del suelo (Suarez, 2001). Se cuantifica a partir del contenido de carbón orgánico dentro de la cuenca según el factor de corrección de Bemmelen (Healton et al., 2016) como se muestra en la Ecuación 1.6.

$$\%OM = 1.724 \%C \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Los valores de arena, limo, arcilla y carbón orgánico fueron obtenidos de la Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo publicado por la FAO en el año 2009. El registro posee información a nivel nacional y regional del Mapa de Suelos del mundo de la FAO – UNESCO (FAO, 1981). La Tabla 5 muestra los 7 tipos de suelos identificados con sus respectivos parámetros.

Tabla 5. Porcentajes de Arena, Limo, Arcilla y Carbón orgánico de los tipos de suelo considerados en la cuenca de estudio. Fuente: FAO, 1981. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal>

	% Arena	% Limo	% Arcilla	% CO	Tipo de Suelo
Suelo 1	56	30	14	2.76	sandy loam
Suelo 2	72	16	12	2.72	sandy loam
Suelo 3	37	45	18	2.35	loam
Suelo 4	57	24	19	0.97	sandy loam
Suelo 5	48	24	28	2.02	sandy clay loam
Suelo 6	69	20	11	1.45	sandy loam
Suelo 7	23	29	48	1.94	clay

La variable *s* representa el tipo de suelo en base la estructura de la capa superficial, como lo define Suarez (2001), a partir de la asignación de valores según las siguientes características mostradas en la Tabla 6.

*Tabla 6. Valores de parámetro *s* para aplicar en el factor *K* en ecuación USLE. Fuente: Suarez, 2001, p.39.*

Valor <i>s</i>	Tamaño de partículas
1	Partículas de grano muy fino menores a 1 mm.
2	Partículas de grano fino a 1 a 2 mm.
3	Partículas de grano medio de 2 a 5 mm y grano grueso de 5 a 10 mm.
4	Partículas muy gruesas mayores a 10 mm.

Asimismo, la variable *p* describe la capacidad de transporte de agua a través del suelo, es decir, la permeabilidad. En la cuenca se identificaron 7 tipos de suelo para los cuales se establecieron valores de permeabilidad según su estructura, considerando los valores de la Tabla 7 publicada por la FAO.

Tabla 7. Valores de permeabilidad media para diferentes texturas del suelo en cm/hora. Fuente: FAO. Recuperado de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm

Arenosos	5
Franco arenosos	2.5
Franco	1.3
Franco arcillosos	0.8
Arcilloso limosos	0.25
Arcilloso	0.05

Con los valores de permeabilidad obtenidos, se designó para cada tipo de suelo el índice de permeabilidad para aplicar en la ecuación USLE (Mancilla, 2008) como se muestra en la Tabla 8.

*Tabla 8. Índice de permeabilidad *p* para aplicar en el factor *K* en Ecuación USLE. Fuente: Mancilla, 2008, p.16.*

Factor <i>P</i>	Categoría de Permeabilidad
1	Rápida (más de 12.7 cm/h)
2	Moderada a rápida (6.3 a 12.7 cm/h)
3	Moderada (2 a 6.3 cm/h)
4	Lenta a moderada (0.5 a 2 cm/h)
5	Lenta (0.13 a 0.5 cm/h)
6	Muy lenta (menor a 0.13 cm/h)

7.1.3 Factor topográfico LS de la cuenca

Las variables que describen el relieve del terreno son la longitud del talud L y la pendiente S que posee. Ambos factores representan la intensificación de la erosión debido a la topografía de la cuenca al aumentar su longitud e inclinación (Zisu y Nasui, 2015).

En primer lugar, a partir de un modelo digital de elevación DEM (Rosas, 2016), se obtienen las pendientes de la cuenca y se cuantifican las variables β y m, según la Ecuación 1.7 y 1.8.

$$\beta = \frac{\frac{\sin \theta}{0.0896}}{3 \sin \theta^{0.8} + 0.56} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

$$m = \frac{\beta}{1+\beta} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Luego, con los valores hallados, calculamos el mapa de longitud de terreno L a partir de la Ecuación 1.9 de Desmet y Govers (1996) que considera la acumulación de flujo por pixel considerando la dimensión de cada celda (Gomes et al., 2017).

$$L_{(i,j)} = \frac{|A_{(i,j)+D^2|^{(m+1)} - A_{(i,j)}^{(m+1)}}}{x^m D^{m+2} (22.13)^m} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Donde,

- β = Pendiente (radianes)
- A = Acumulación del flujo
- D = Lado del píxel
- X = Coeficiente de forma (en este caso, se asume x=1)

El factor S, expresado por la Ecuación 1.10 describe la pendiente del terreno, por lo tanto, para el caso de zonas montañosas y regiones muy accidentadas, se deben realizar las correcciones respectivas de la ecuación (Suarez, 2001). En este caso, se han elaborado estudios previos a nivel regional en el Perú con la ecuación presentada ya que no considera la superficie del terreno como uniforme; por lo tanto, será de utilidad aplicarla para realizar las comparaciones respectivas de resultados.

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03, & \text{si } \tan \theta < 0.09 \\ 16.8 \sin \theta - 0.5, & \text{si } \tan \theta > 0.09 \end{cases} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

7.1.4 Factor de Cobertura Vegetal C

El factor C representa la influencia del tipo de cobertura y vegetación que posee la cuenca. Asimismo, se considera un factor de sensibilidad ante la erosión ya que el tipo de cobertura que posee el suelo, según la hipótesis planteada, le otorga protección sobre el impacto del escurrimiento.

Debido a que no se han establecido factores de cobertura vegetal para el Perú, la variable será calculada a partir del Índice de Vegetación NDVI, el cual describe el tipo de cubierta que posee el suelo a partir de un solo factor o coeficiente que va desde 0, cuando el terreno se encuentra completamente intervenido o degradado, y 1, cuando el suelo se encuentra completamente protegido por la vegetación (Zisu y Nasui, 2015). Los valores de NDVI negativos indican la presencia de nubosidad, nieve o superficies de agua, los cuales, no serán considerados durante el análisis.

Para obtener el índice de vegetación se trabajará con 4 imágenes satelitales de los años 1990, 2005, 2014 y 2017 como se muestra en la Tabla 9. La elección de los años considerados para el análisis se elaboró a partir de la disponibilidad de imágenes satelitales libres en la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Se eligió aquellas imágenes que hayan sido captadas en fechas cercanas, con un porcentaje de nubosidad menor al 10% y que contengan las bandas necesarias para el cálculo de NDVI (Banda 3 y Banda 4).

Tabla 9. Detalle de imágenes satelitales empleadas en el estudio. Fuente propia.

Imagen	Fecha	Bandas
Imagen Landsat 5 - Año 1990	12/07/1990	Banda 3 y Banda 4
Imagen Landsat 5 - Año 2005	28/07/2005	Banda 3 y Banda 4
Imagen Landsat 7 - Año 2014	22/08/2014	Banda 3 y Banda 4
Imagen Landsat 7 - Año 2017	26/06/2017	Banda 3 y Banda 4

Los valores de NDVI se calculan a partir de las bandas roja (Banda 3) e infrarroja (Banda 4) del espectro electromagnético que emite la vegetación para cada año (Capecchi et al., 2008), a partir de la Ecuación 1.11.

$$NDVI = \frac{NIR-VIS}{NIR+VIS} \quad (\text{Ec. 1.11})$$

NIR = Reflectividad en banda infrarrojo cercano

VIS = Reflectividad en banda rojo

Los valores de NDVI son representados en la Figura 13 para el año 1990, Figura 14 para el año 2005, Figura 15 para el año 2014 y Figura 16 para el año 2017. Para realizar el cálculo del factor C de la cuenca, se asigna a cada valor obtenido de NDVI una clasificación de cobertura vegetal para interpretar y comprobar el resultado obtenido en los mapas. Por ejemplo, los valores con NDVI igual o inferiores a 0 representan superficies de suelo desnudo, presencia de nubes, nieve y agua; y los valores cercanos a 1 representan zonas cubiertas de vegetación como bosques (Peña, 2007). Como referencia para la asignación y clasificación de los valores de NDVI, se utilizó el Mapa de Cobertura Vegetal del Perú elaborado por el MINAM.

Tabla 10. Valores del Factor C. Fuente: Dumas, 2012, p.28.

Usos del suelo Corine Land Cover	% Cobertura	Factor c
Zonas industriales o comerciales		1,000
Zonas de extracción minera		1,000
Viñedos		0,525
Tierras de labor secano		0,435
Terrenos regados permanentemente		0,507
Terrenos principalmente agrícolas con vegetación natural		0,435
Tejido urbano discontinuo		1,000
Tejido urbano continuo		1,000
Pastizales naturales		0,130
Olivares		0,525
Mosaico de cultivos		0,435
Matorrales esclerófilos		0,153
Matorral boscoso en transición		0,153
Lámina de agua		0,000
Frutales		0,525
Espacios con vegetación escasa		0,900
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes		0,435
Bosque mixto	Inferior al 2%	0,186
Bosque mixto	> 2% & <7%	0,086
Bosque mixto	Superior al 7%	0,041
Bosque de frondosas	Inferior al 2%	0,186
Bosque de frondosas	> 2% & <7%	0,086
Bosque de frondosas	Superior al 7%	0,041
Bosque de coníferas	Inferior al 2%	0,186
Bosque de coníferas	> 2% & <7%	0,086
Bosque de coníferas	Superior al 7%	0,041

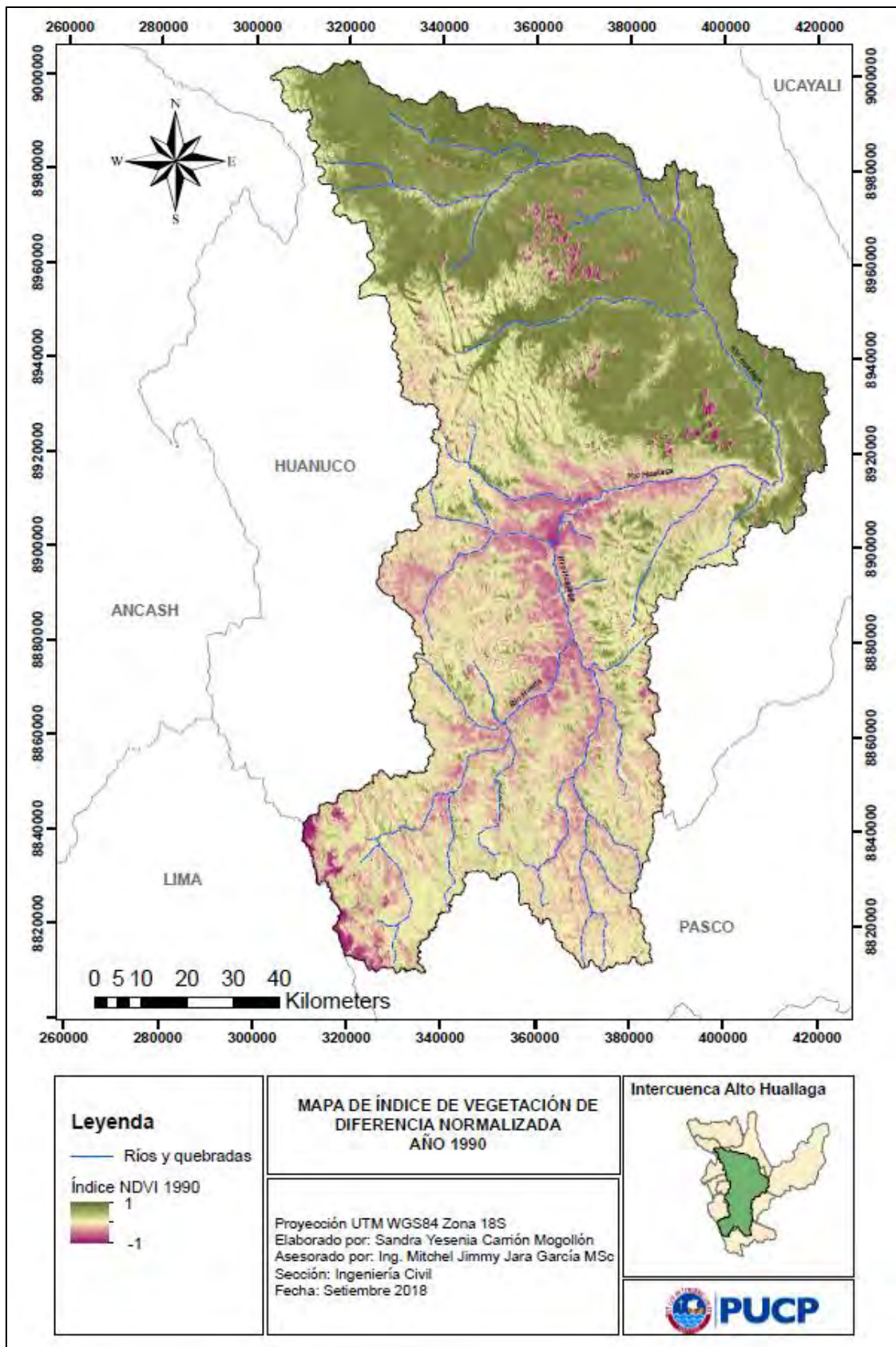


Figura 13. Índice de Vegetación de diferencia normalizada NDVI para el año 1990. Fuente propia.

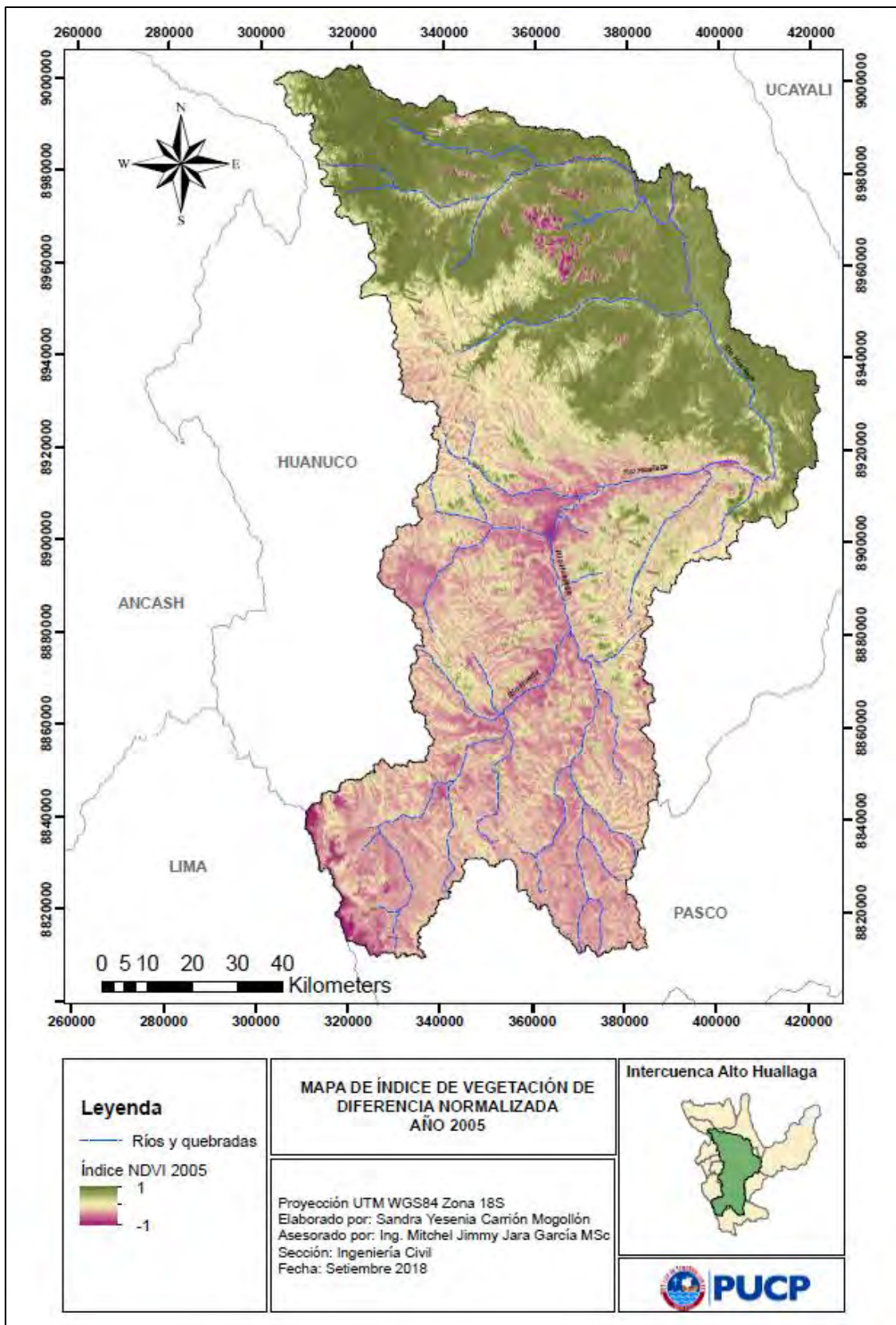


Figura 14. Índice de Vegetación de diferencia normalizada NDVI para el año 2005.
Fuente propia.

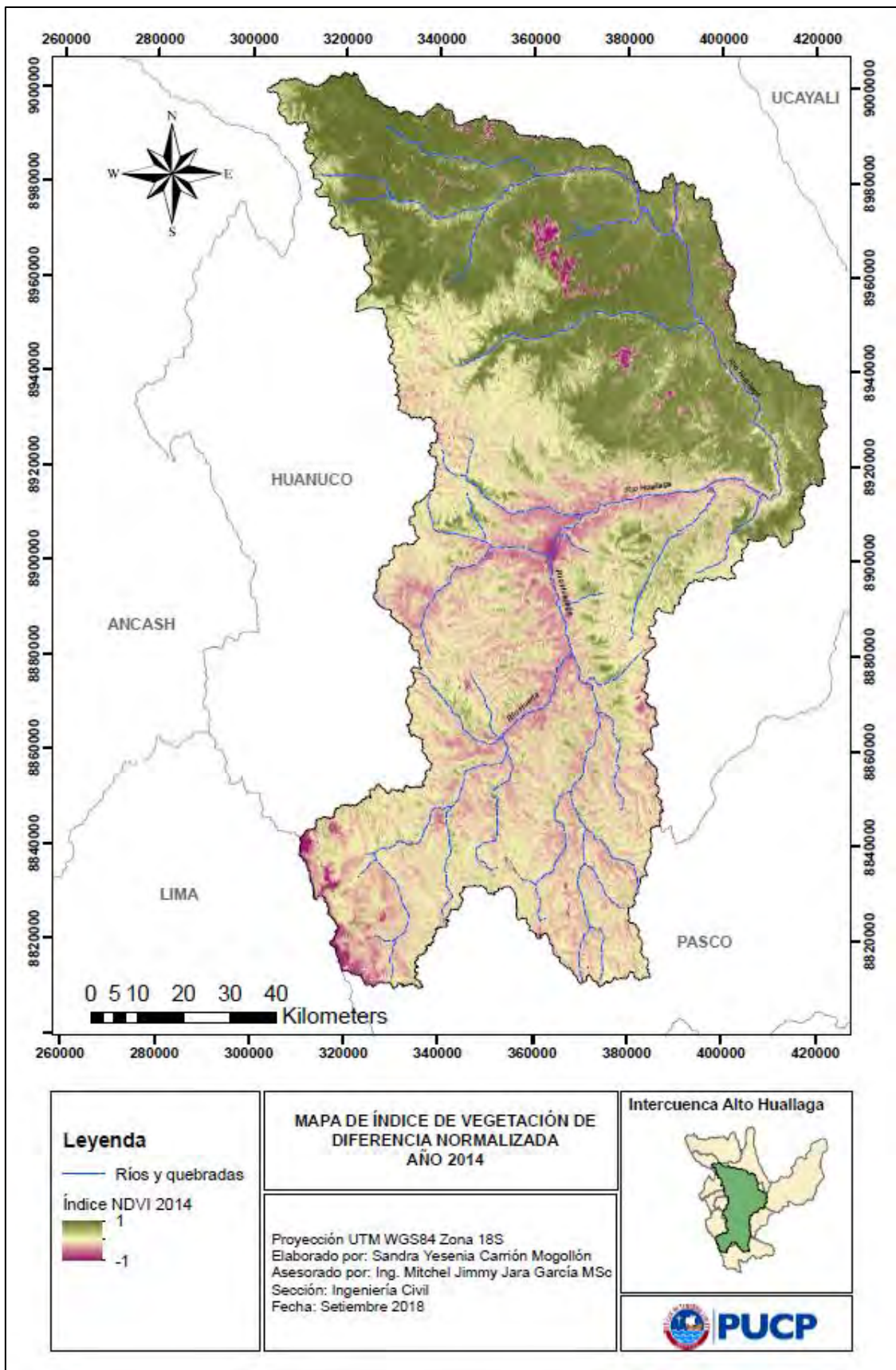


Figura 15. Índice de Vegetación de diferencia normalizada NDVI para el año 2014. Fuente propia.

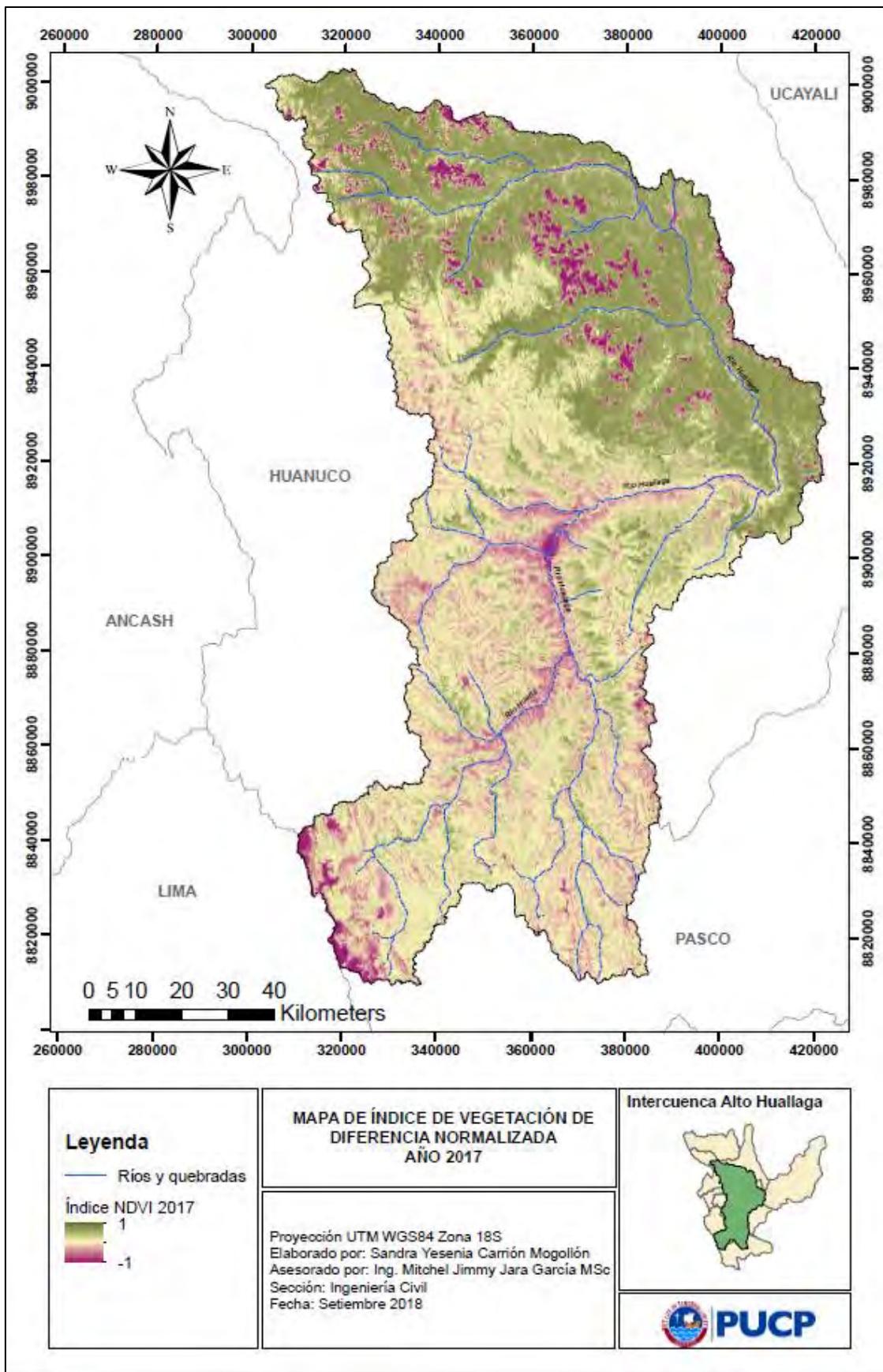


Figura 16. Índice de Vegetación de diferencia normalizada NDVI para el año 2017. Fuente propia.

Tabla 11. Tabla de Valores de Factor C para Ecuación USLE. Fuente: Morgan, 2005, p.122.

Practice	Average annual C-factor
Bare soil	1.00
Forest or dense shrub, high mulch crops	0.001
Savanna or prairie grass in good condition	0.01
Overgrazed savanna or prairie grass	0.10
Maize, sorghum or millet; high productivity; conventional tillage	0.20-0.55
Maize, sorghum or millet; low productivity; conventional tillage	0.50-0.90
Maize, sorghum or millet; high productivity; chisel ploughing into residue	0.12-0.20
Maize, sorghum or millet; low productivity; chisel ploughing into residue	0.30-0.45
Maize, sorghum or millet; high productivity; no or minimum tillage	0.02-0.10
Cotton	0.40-0.70
Meadow grass	0.01-0.025
Soya beans	0.20-0.50
Wheat	0.10-0.40
Rice	0.10-0.20
Groundnuts	0.30-0.80
Palm trees, coffee, cocoa with cover crops	0.10-0.30
Pineapple on contour; residue removed	0.10-0.40
Pineapple on contour; with surface residue	0.01
Potatoes; rows downslope	0.20-0.50
Potatoes; rows across slope	0.10-0.40
Cowpeas	0.30-0.40
Strawberries; with weed cover	0.27
Pomegranate; with weed cover	0.08
Pomegranate; clean-weeded	0.56
Ethiopian tef	0.25
Sugar cane	0.13-0.40
Yams	0.40-0.50
Pigeon peas	0.60-0.70
Mungbean	0.04
Chilli	0.33
Coffee: after first harvest	0.05
Plantains: after establishment	0.05-0.10
Papaya	0.21

Los factores C de cobertura vegetal se han asignado según tablas de referencia de la literatura para cada sistema de cultivo; en este caso, se consideraron las establecidas por Africa Dumas (2012) en el estudio Riesgo de Erosión Hídrica en la Cuenca Hidrográfica del Río Mundo, debido a las condiciones que expone la cuenca similar a la de estudio, y a los planteados por Morgan (2005) en el libro Soil Erosion & Conservation, según las Tablas 10 y 11 respectivamente. Finalmente, la Tabla 12 muestra valores de NDVI, tipo de cobertura y Factor C asignados a la cuenca.

Tabla 12. NDVI del territorio y tipo de cubierta. Fuente propia.

NDVI	Tipo de Cubierta	Factor C
De -1 a 0	Glaciar, lagunas, nubes	0
0.00 a 0.10	Áreas urbanas	1
0.10 a 0.30	Matorral arbustivo	0.153
0.30 a 0.40	Agricultura altoandina	0.435
0.40 a 0.50	Cultivos anuales	0.25
0.50 a 0.60	Pajonal	0.13
0.60 a 0.70	Zonas desboscadas para cultivo agrícola	0.086
0.70 a 1.00	Bosque	0.001

7.1.5 Factor de prácticas de prevención y control de erosión P

El factor de prácticas de conservación del suelo describe las medidas utilizadas en el territorio para combatir los problemas de erosión y disminuir el impacto dentro de la cuenca (Gomes et al., 2017). Las actividades comúnmente realizadas son los trabajos de colocación de cultivos en áreas intervenidas, construcción de terrazas, reforestación, etc. los cuales, dependiendo del tipo de medida aplicada, se le asigna un factor de 0 a 1. Por ejemplo, si no se han aplicado prácticas de prevención, el valor de P será igual a la unidad, manteniendo el resultado de pérdida de suelo; por el contrario, si el valor es menor a 1, la cantidad final de suelo removido producto de la erosión disminuye. En el caso del estudio, el valor se considera P igual a 1, ya que no se posee un registro de actividades que disminuyan los problemas de erosión en la zona; por lo tanto, se asume la unidad como primera aproximación.

7.2. Análisis hidrológico de la cuenca a partir del modelo GR2M

7.2.1 Descripción general del modelo hidrológico

Los modelos son una representación del sistema hidrológico que posee una cuenca (Aliaga, 1985) y tiene como estructura una frontera que permite entradas, como el agua, y produce salidas (VenTe Chow, 1994), aproximando su comportamiento al de un sistema real. La elección del tipo de modelo que mejor represente la zona de estudio depende de la disponibilidad de datos (Fattorelli, 2011). En el caso que se conozca la mayor cantidad de variables para incluir en el sistema, se trabajará con un modelo complejo, en caso contrario, deberá elegirse un modelo simple para áreas con poca información.

En el Perú existen pocos registros climáticos de estaciones meteorológicas, debido al accidentado relieve que posee la topografía, lo cual origina que existan zonas inaccesibles y regiones aisladas (ANA, 2015). De igual manera, los datos disponibles poseen series incompletas de información y alta variabilidad, lo cual complica la estimación del comportamiento real de los procesos.

7.2.2 Clasificación de modelos

Los modelos hidrológicos se clasifican a partir de las variables que ingresan al sistema, es decir, si son aleatorias o dependen del espacio y tiempo (Ven Te Chow, 1994). Debido a los agentes externos que intervienen en el sistema, los modelos se pueden dividir en determinísticos y estocásticos (Heras, 1983), como se observa en la Figura 17.

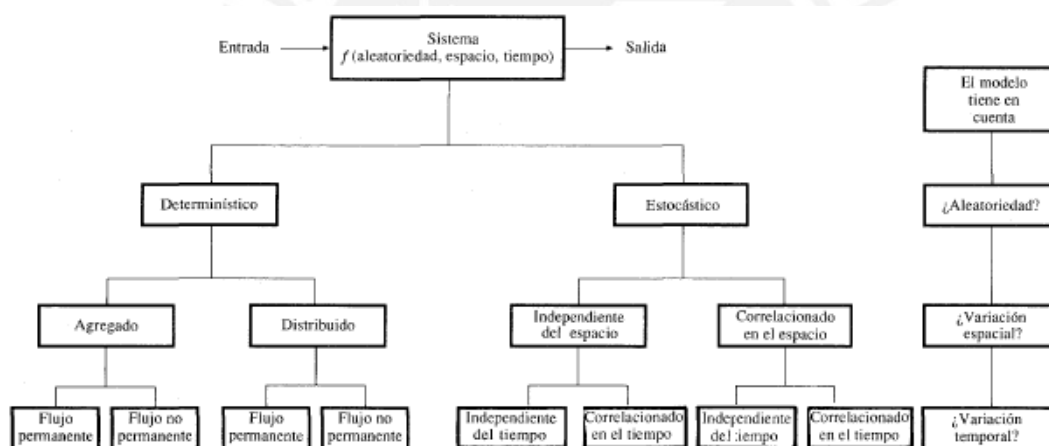


Figura 17. Clasificación de modelos hidrológicos. Fuente: Ven Te Chow, 1994, p.11.

7.2.2.1 Modelos determinísticos

Los modelos determinísticos son aquellos en donde los parámetros involucrados de entrada y salida en el sistema son representados por funciones que describen el comportamiento de la cuenca (Fattorelli, 2011). Los modelos determinísticos no consideran valores aleatorios, es decir, todo valor de entrada posee una respuesta única y conocida sin predecir valores de salida como los modelos estocásticos (Aliaga, 1985).

7.2.2.2 Modelos estocásticos

Los modelos estocásticos consideran variables obtenidas a partir de muestreos, las cuales son representadas por distribuciones probabilísticas (Fattorelli, 2011). En la mayoría de los casos, los procesos hidrológicos son representados por modelos estocásticos ya que los fenómenos estudiados poseen un grado de aleatoriedad alto (Ven Te Chow, 1994), como aquellos empleados en la precipitación diaria.

Para la aplicación de un modelo hidrológico es necesario el proceso de calibración de resultados para generar una similitud entre el modelo y los datos finales observados. Sin embargo, debido al desarrollo de técnicas de obtención de información espacial, las funciones consideradas dentro de los modelos determinísticos son cada vez menos utilizadas debido a la gama de información satelital real disponible.

7.2.3 Descripción del Modelo GR2M

El modelo GR2M es un modelo francés desarrollado por el Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia, que calcula caudales a partir de datos de precipitación y temperatura (Carmona et al., 2013). Es un modelo hidrológico global que simula variables mensuales (SENAMHI, 2016) a partir de parámetros que caracterizan a la cuenca como máxima capacidad de almacenamiento del reservorio y el coeficiente de intercambio de agua subterránea (SENAMHI, 2015).

La estructura del modelo deriva del desarrollo de los modelos mensuales propuestos por Makhlouf y Michel (1994) y el modelo a escala diaria GR4J (Mouelhi et al., 2005), como se observa en la Figura 18, de los cuales, se redujo su complejidad disminuyendo los parámetros libres o variables. Se evaluó, a partir de un análisis estadístico, la influencia de cada parámetro sobre el modelo, para identificar los componentes con mayor utilidad y aquellos que pueden ser reemplazados por valores constantes para contribuir con brindarle simplicidad al modelo.

El modelo contaba, inicialmente, con 5 parámetros libres que podían ser calibrados según las condiciones de la cuenca, que se muestran en la Tabla 13. Sin embargo, se evaluó la eficiencia del modelo elaborando versiones con diferentes combinaciones de parámetros hasta identificar el mínimo de parámetros libres en donde la eficiencia del modelo mejore o se conserve. En la Figura 9 se muestra el gráfico del criterio de evaluación C (eficiencia aumenta cuando $C=0$) y el número de parámetros libres, en donde se observa que con 2 parámetros libres no existen cambios significativos en la eficiencia del modelo a escala mensual.

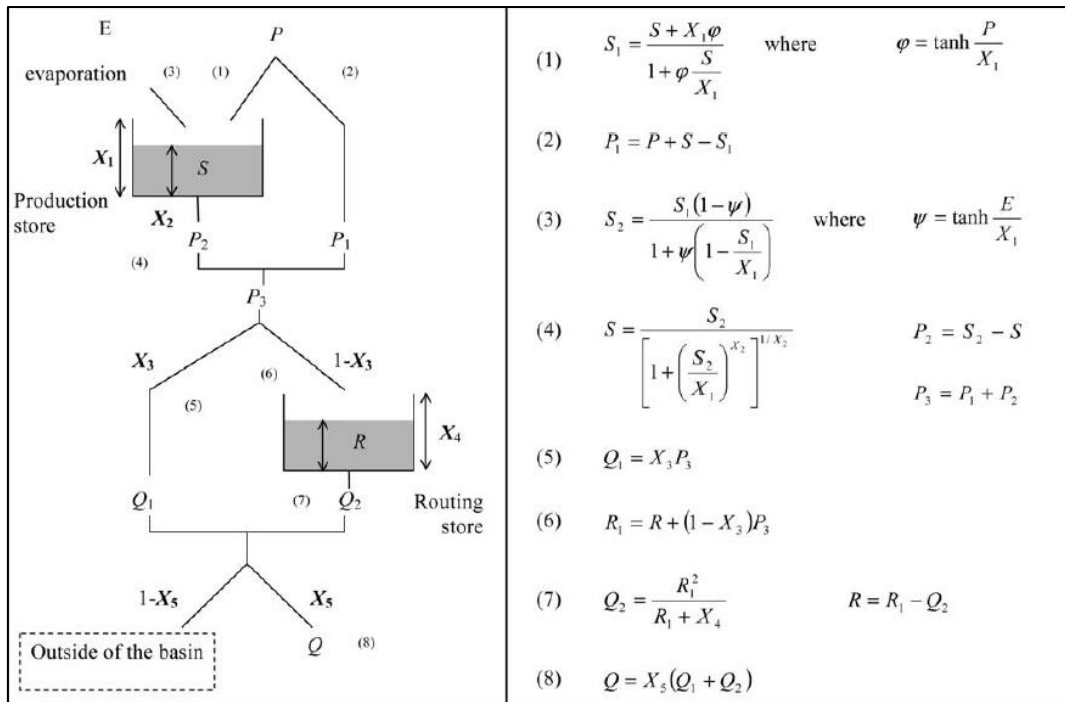


Figura 18. Diagrama de estructura inicial del modelo. Fuente: Mouelhi et al., 2005, p. 205.

Tabla 13. Parámetros libres de esquema inicial del modelo GR2M.

X1	Máxima capacidad de almacenamiento del reservorio suelo
X2	Coefficiente de variación de agua en el reservorio
X3	Componente de descarga del reservorio suelo
X4	Máxima capacidad de almacenamiento del reservorio gravitacional
X5	Coefficiente de intercambio de agua subterránea

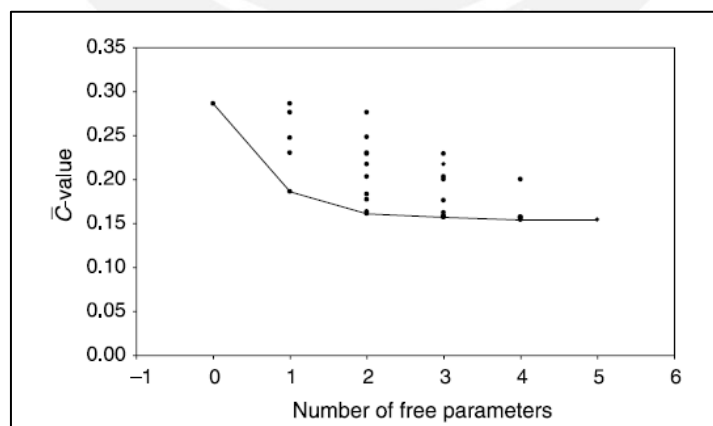


Figura 19. Gráfico de criterios de eficiencia de las posibles versiones de esquemas del modelo GR2M en función del número de parámetros libres. Fuente: Mouelhi et al., 2005, p. 207.

Los parámetros X_1 y X_5 mostraron mayor sensibilidad; por lo tanto, son los que poseen mayor relevancia en el modelo. De esta manera, se simplificó la estructura inicial a un modelo a escala mensual con 2 variables libres, como se muestra en la Figura 20. El modelo obtenido consiste en dos depósitos que transforman la precipitación en escurrimiento a partir de dos funciones: la función de producción y la función de transferencia (Herrera, 2015). La función de producción representa los procesos ocurridos dentro del reservorio suelo (reservorio producción) y la función de transferencia calcula, finalmente, el escurrimiento en la salida de la cuenca a partir del reservorio de agua gravitacional (Mouehli et al., 2005).

Para el desarrollo del modelo en la Intercuenca Alto Huallaga se asumió la arquitectura mostrada en la Figura 21. en donde se pueden observar los principales procesos hidrológicos de manera simplificada (SENAMHI, 2016).

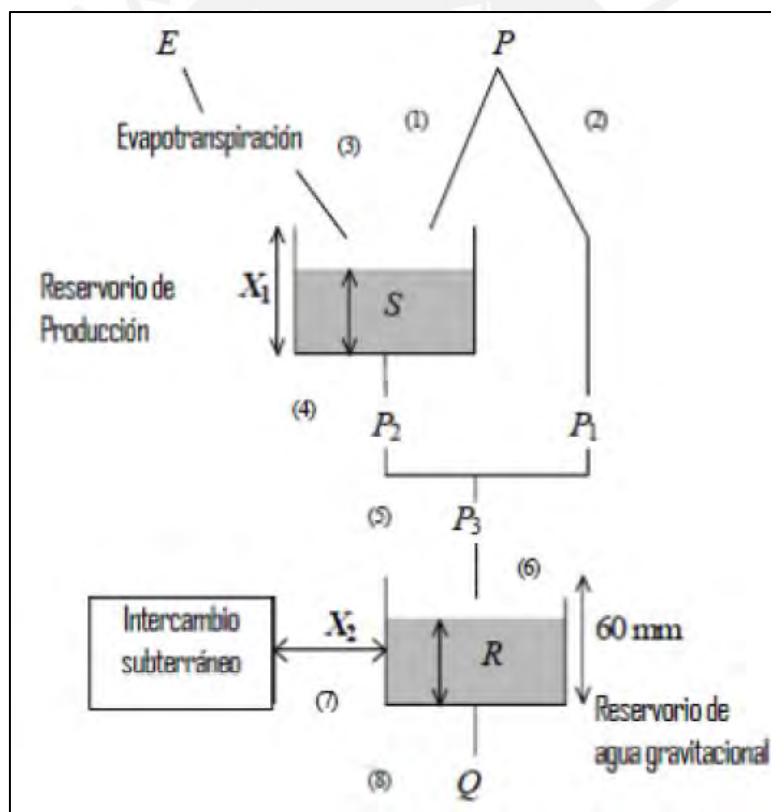


Figura 20. Estructura del modelo GR2M. Fuente: CEMAGREF.

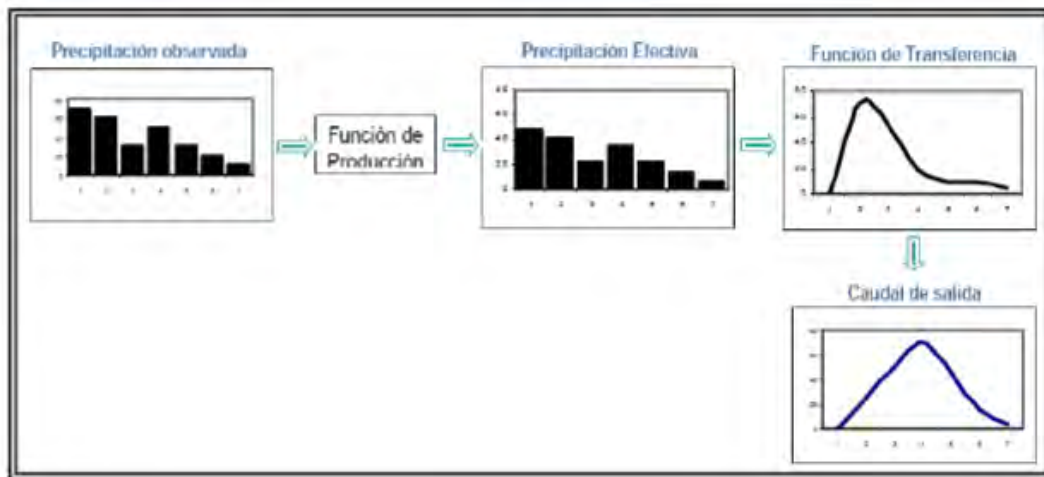


Figura 21. Esquema de la transformación de la precipitación a caudal de salida en la cuenca de estudio. Fuente: SENAMHI, 2016.



Dentro del sistema, P representa la precipitación media mensual; E, la evapotranspiración; P1, la escorrentía superficial; P2, la percolación profunda en el suelo; S, el almacenamiento inicial del reservorio de producción; R, el almacenamiento inicial del reservorio de agua gravitacional y Q el caudal de salida de la cuenca.

El modelo considera que la precipitación es la primera variable de entrada, de la cual un porcentaje ingresa directamente al reservorio suelo y otro al reservorio de agua gravitacional. El reservorio suelo posee inicialmente un valor igual a S (mm) que aumenta debido al nuevo ingreso de agua al sistema por precipitación como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

En donde la variable X1 representa la capacidad máxima de almacenamiento del reservorio de producción y φ se calcula con la Ecuación 2.2.

$$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

De manera consecuente, el valor de la precipitación P1 que ingresa al reservorio gravitacional se puede expresar a partir de la Ecuación 2.3.

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Asimismo, el cálculo del valor de lámina de agua que sale del reservorio de producción depende de la precipitación inicial y de la evapotranspiración ocurrida dentro de la cuenca. Por lo tanto, se realiza el cálculo del nuevo volumen S2 afectado por las dos variables, descrita por la Ecuación 2.4.

$$S_2 = \frac{S_1(1-\psi)}{1 + \psi\left(1 - \frac{S}{X_1}\right)} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

En donde Ψ se calcula con la expresión siguiente:

$$\Psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$$

Luego, parte del agua que posee el reservorio percola fuera del sistema, dejando un nuevo volumen inicial expresado por la Ecuación 2.5 para el siguiente mes en donde se repite el mismo proceso. La Ecuación 2.6 indica la lámina de agua que sale del reservorio suelo para ingresar al de transferencia.

$$S = \frac{S_2}{\left(1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right)^{1/3}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$P_2 = S_2 - S \quad (\text{Ec. 2.6})$$

La suma de la cantidad de agua que percola del reservorio de producción y el porcentaje de precipitación inicial que escurre en la superficie, son las variables de entrada al nuevo sistema, denominada precipitación efectiva (Lamprea, 2011), alcanzando un nuevo volumen inicial del reservorio de transferencia según las expresiones siguientes.

$$P_3 = P_1 + P_2$$

$$R_1 = R + P_3$$

Se realiza la corrección respectiva debido al intercambio de agua subterránea en el sistema. Si el parámetro X_2 es mayor a 1 significa una ganancia significativa de agua al sistema, de lo contrario, representa una pérdida (SENAMHI, 2015), como lo expresa la Ecuación 2.7.

$$R_2 = X_2 R_1 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

El valor de salida del modelo GR2M es el caudal mensual dentro de la cuenca que se expresa como una función cuadrática para cada mes del periodo a analizar según la Ecuación 2.8.

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

7.2.4 Aplicación del Modelo GR2M

7.2.4.1 Análisis de datos

Se realiza el análisis, tratamiento, completación y extensión de la información meteorológica para cada una de las estaciones en estudio para lograr obtener registros desde el año 1980 hasta el 2018.

7.2.4.1.1 Análisis de consistencia de información

7.2.4.1.1.1 Análisis estadístico de saltos y tendencias

A partir del software SIH, desarrollado por la Intendencia de Recursos Hídricos del Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), se elaboró el análisis estadístico de los valores de precipitación a escala mensual. Para evaluar la consistencia de datos, se aplicó el análisis de saltos y tendencias a partir de la prueba "T" de Student, que

analiza la homogeneidad estadística de la media, y la prueba “F” de Fisher, que evalúa la desviación estándar de los datos, identificando los periodos confiables y dudosos para su posterior corrección.

En el Anexo 1. se muestra la evaluación de saltos y tendencias de la precipitación para cada estación meteorológica. Las estaciones corregidas por salto fueron Canchán, Chaglla, Huánuco, Oyón, San Rafael, Tingo María y Yanahuanca; sin embargo, no se realizaron correcciones por tendencia en ninguna estación.

7.2.4.1.1.2 Análisis de Doble Masa

Se aplicó el análisis de doble masa a las 8 estaciones meteorológicas en estudio. En primer lugar, se clasificaron las estaciones según su localización geográfica, proximidad, similitud en valores de precipitación media mensual y altitud (m.s.n.m.). Se dividieron las estaciones en 3 grupos según la Tabla 14.

Tabla 14. Estaciones meteorológicas agrupadas para el análisis de doble masa. Fuente propia.

Estaciones Meteorológicas		
Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Oyón	Canchán	Tingo María
Yanahuanca	Huánuco	Carpish
San Rafael		Chaglla

El primer grupo está conformado por las estaciones meteorológicas Oyón, Yanahuanca y San Rafael, que se encuentran ubicadas en la parte alta de la cuenca, a una elevación promedio de 3180 m.s.n.m. La Figura 22 muestra el análisis de doble masa considerando la estación San Rafael como estación base.

Para el segundo grupo se consideraron solo las estaciones Huánuco y Canchán, considerando a la estación Huánuco como estación base debido a su extenso registro de información pluviométrica, como se observa en la Figura 25. Finalmente, las estaciones meteorológicas Chaglla, Carpish y Tingo María forman el tercer grupo debido a su ubicación, en la zona selva de la cuenca, y sus altos valores de precipitación registrada, considerando a la estación Tingo María como estación base, ya que posee un registro con más de 51 años de información, como se observa en la Figura 27.

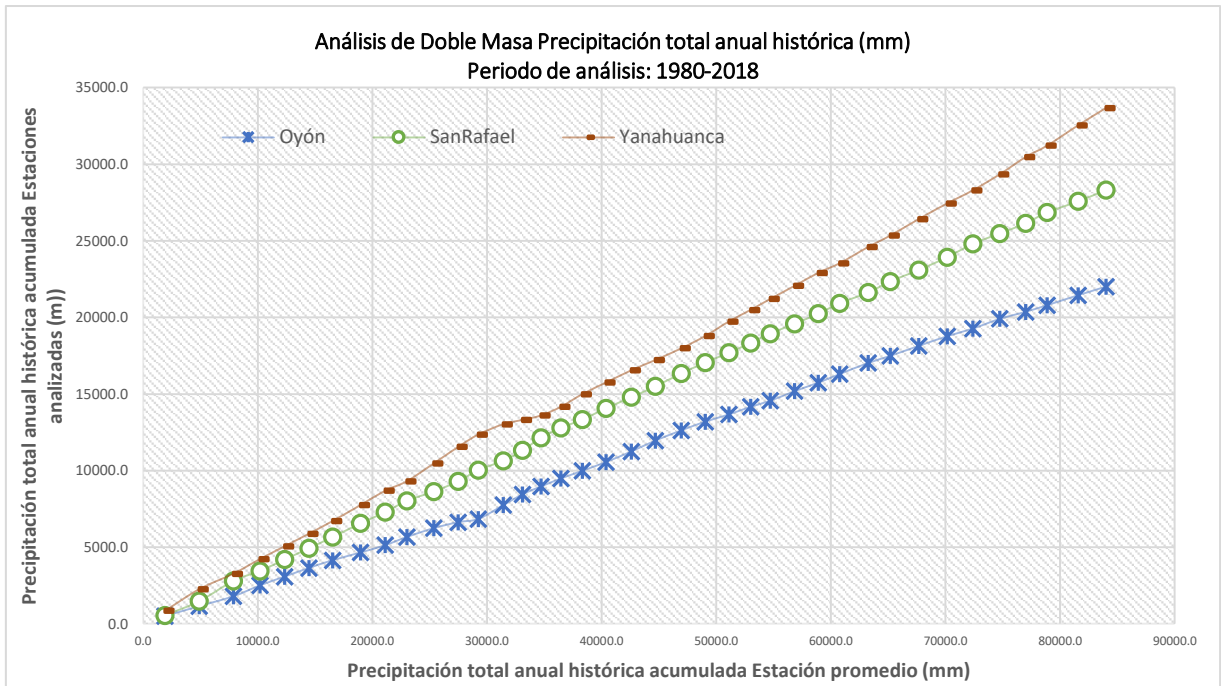


Figura 22. Análisis de doble masa Grupo 1. Estaciones meteorológicas Oyón, San Rafael y Yanahuanca.

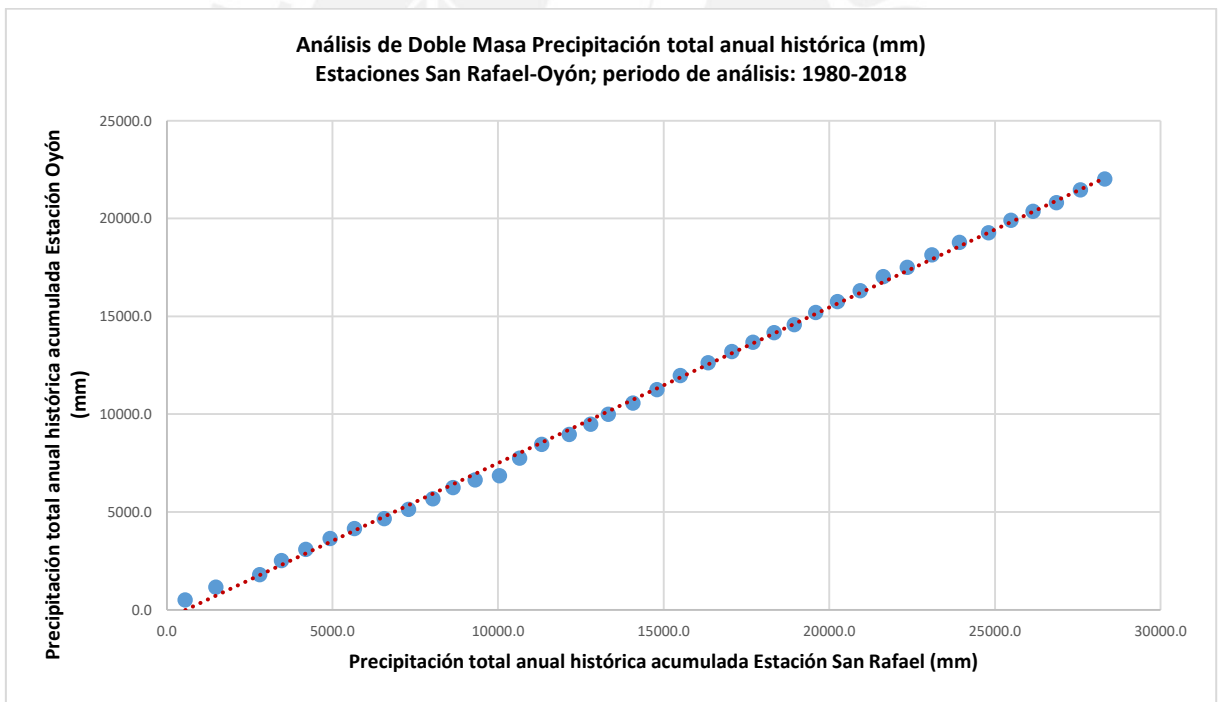


Figura 23. Análisis de doble masa estación San Rafael-Oyón.

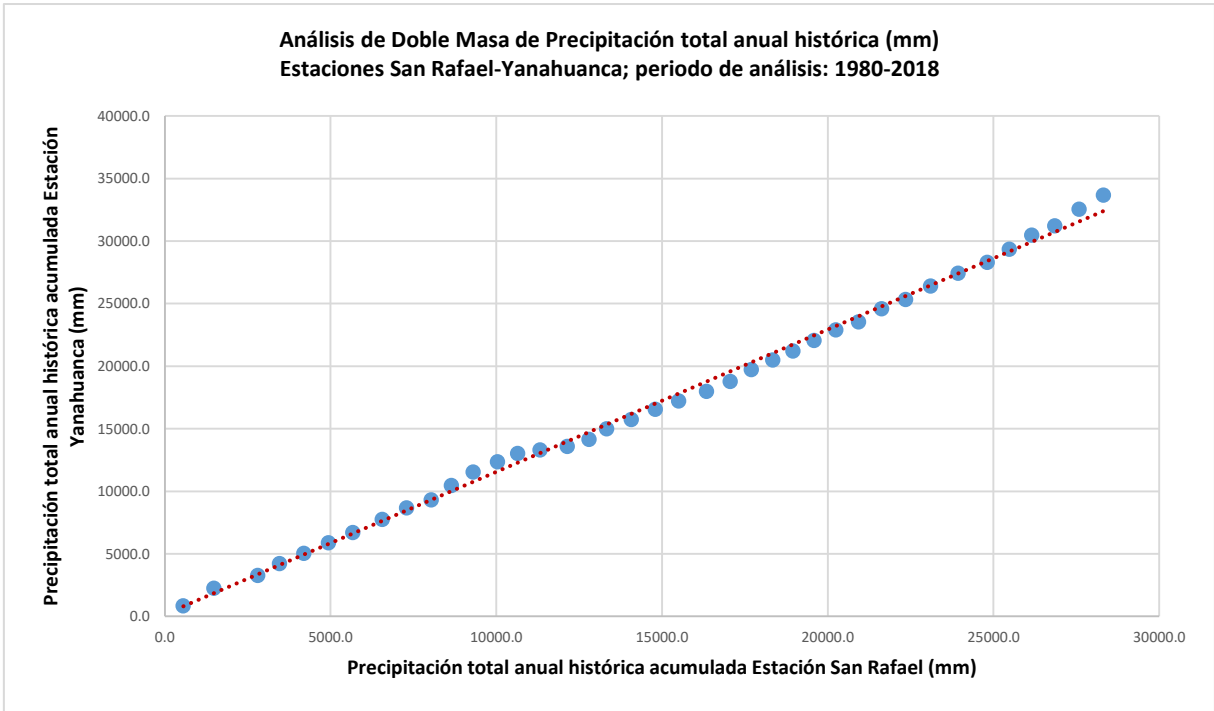


Figura 24. Análisis doble masa estación San Rafael- Yanahuanca.

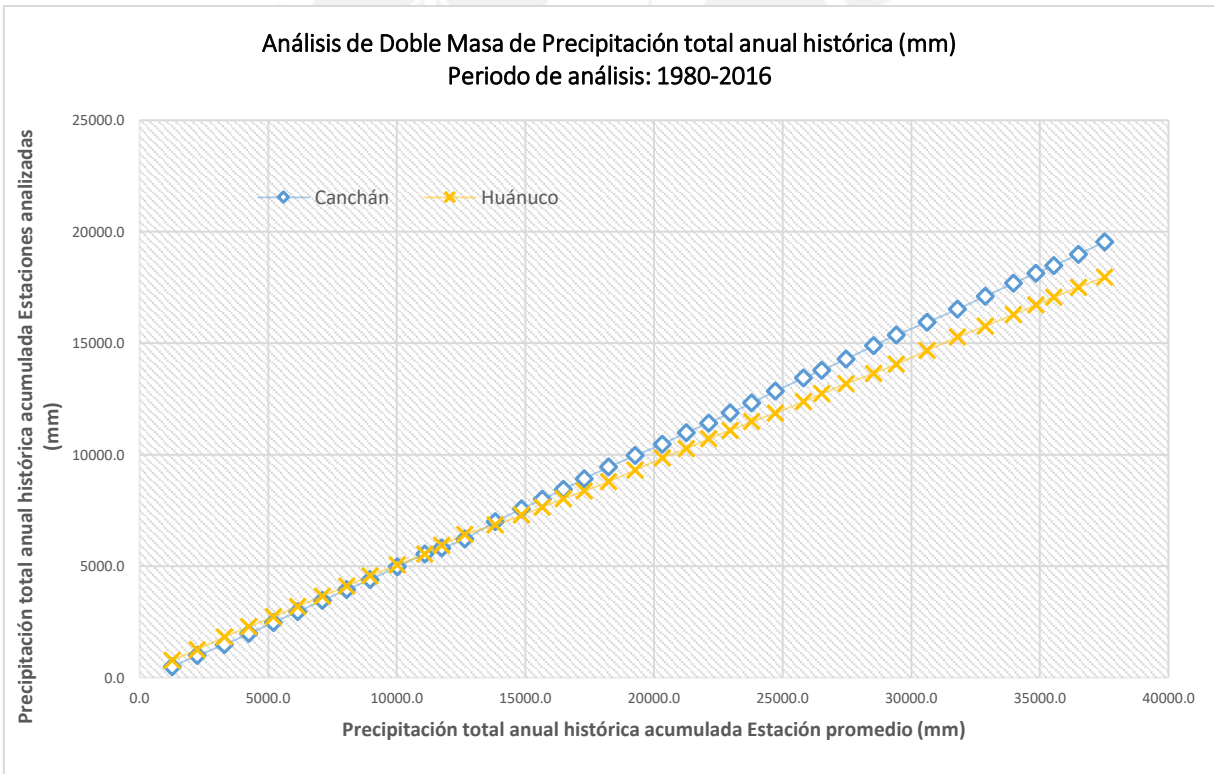


Figura 25. Análisis de doble masa Grupo 2. Estaciones meteorológicas Huánuco y Canchán.

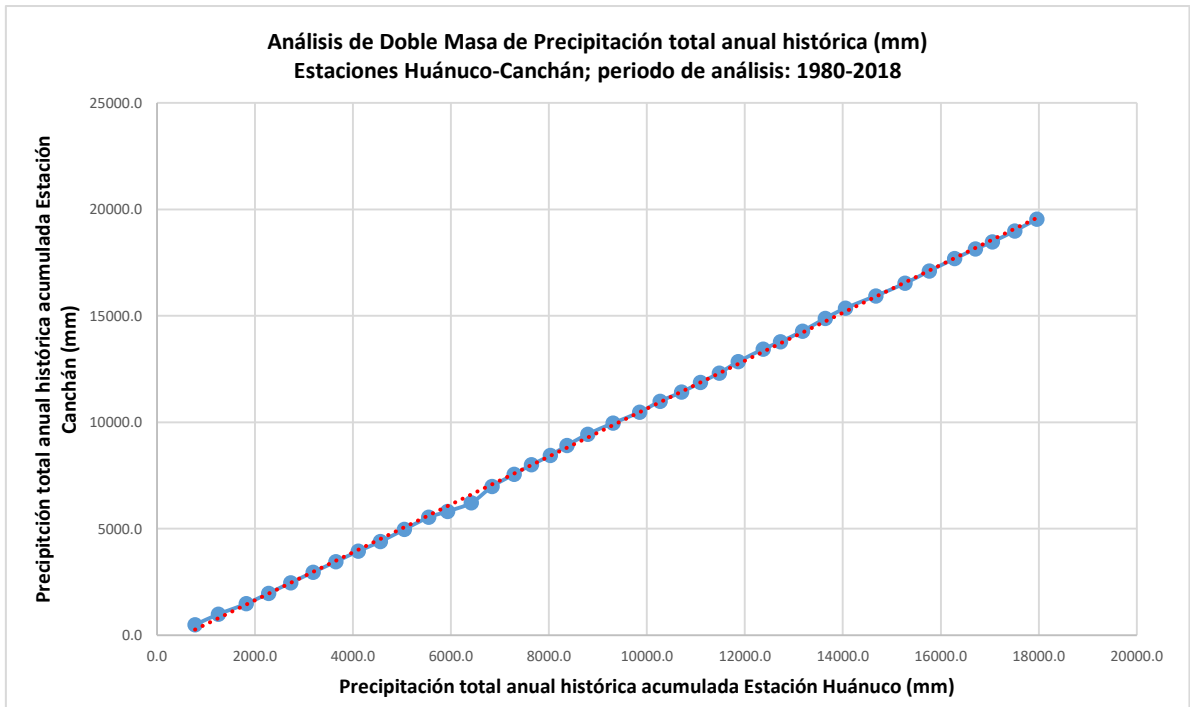


Figura 26. Análisis doble masa estación Huánuco-Canchán.

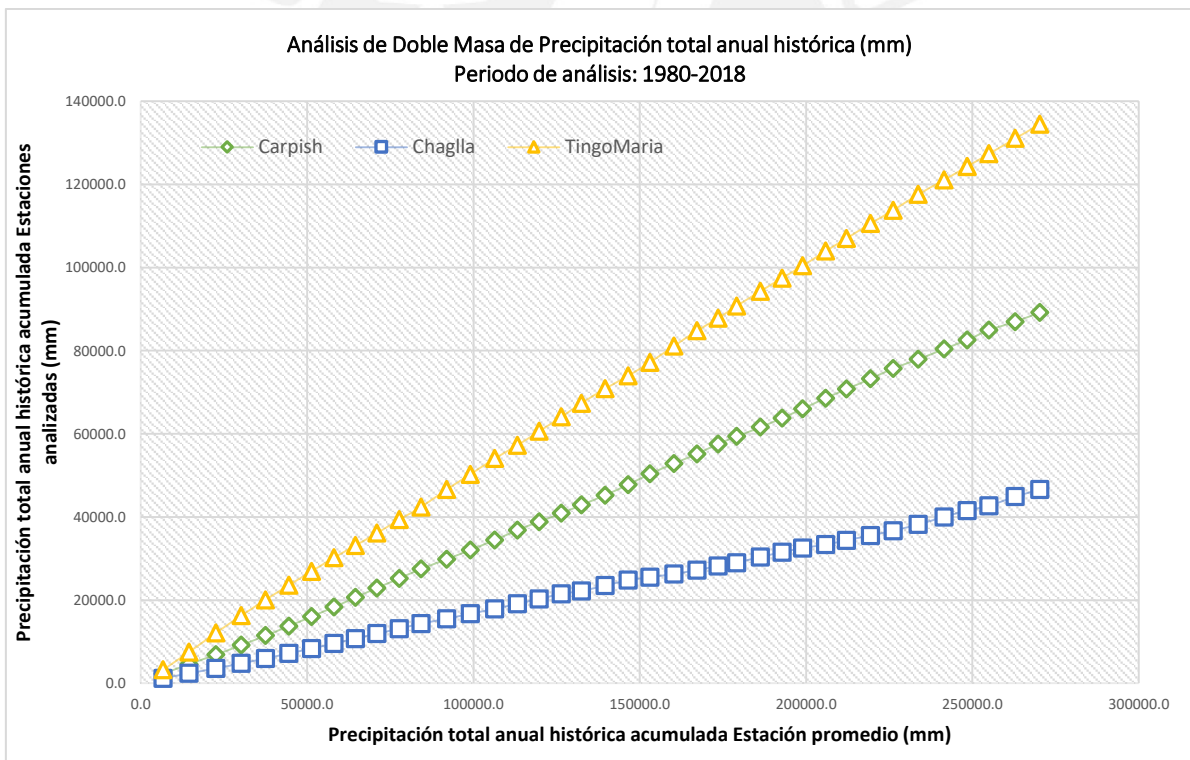


Figura 27. Análisis de doble masa Grupo 3. Estaciones meteorológicas Carpish, Chaglla y Tingo María.

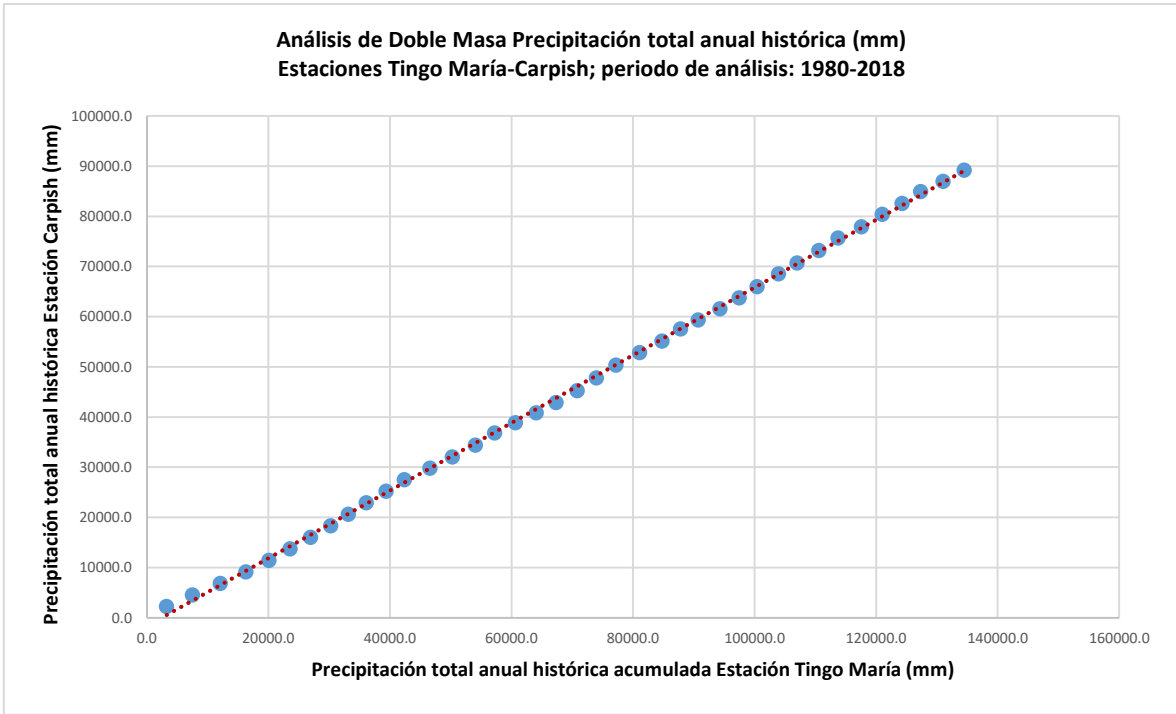


Figura 28. Análisis doble masa estación Tingo María-Carpish.

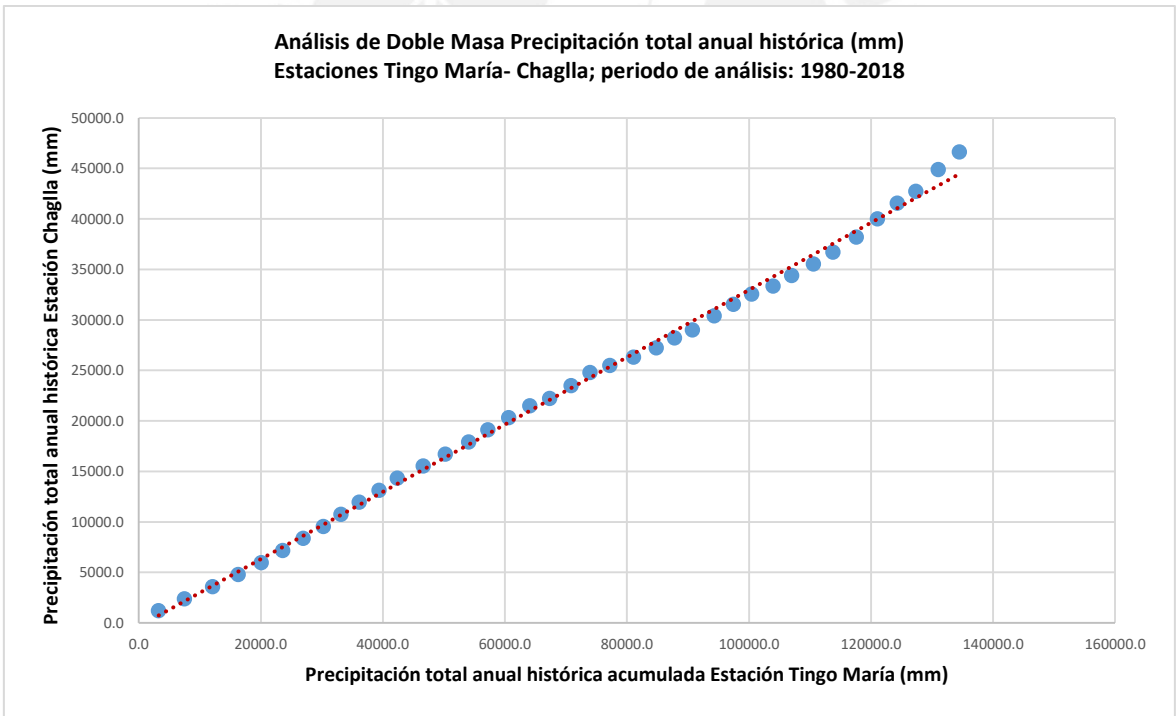


Figura 29. Análisis doble masa estación Tingo María-Chaglla.

Luego de realizar el análisis estadístico para cada estación, analizando los quiebres de las rectas de doble masa, se verificó que no existen errores significativos, ya que los valores se encuentran dentro de los límites de confianza. Por lo tanto, los registros no fueron corregidos.

7.2.4.1.2. Completación y extensión de datos faltantes

El proceso de completación y extensión de datos de precipitación media mensual se realizó utilizando el software HEC4, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. El software realiza matrices de correlación para cada estación meteorológica identificando las estaciones que mejor se relacionen para completar y extender los registros. El mismo proceso se elabora para las series de temperatura mensual.

Los mayores valores de precipitación se encuentran en la estación Tingo María, perteneciente a la zona selva de la cuenca como se muestra en el Figura 30. El cálculo de la precipitación media para toda la superficie se realizó a partir del método de Thiessen que forma polígonos alrededor de cada estación, delimitando su área efectiva (Linsley et al., 1977). El área dentro de cada polígono representa el porcentaje de área total que se debe ponderar para estimar la precipitación media mensual de toda la cuenca (VenTe Chow, 1994). La Figura 32 muestra los polígonos de Thiessen calculados para la Intercuenca alto Huallaga.

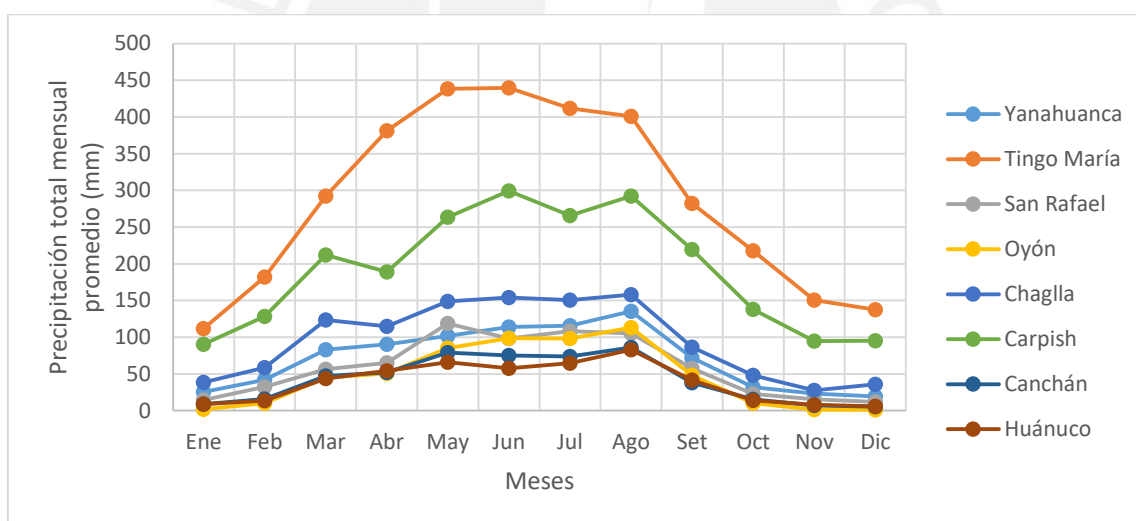


Figura 30. Precipitación total mensual promedio de estaciones meteorológicas en el área de estudio. Fuente propia.

La serie temporal de caudales medios mensuales para realizar la calibración y validación del modelo GR2M, se obtuvo del estudio Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca Huallaga elaborado por la ANA para un total de 34 años de registro como se muestra en la Figura 31. Los primeros 23 años desde 1980 hasta el 2002, serán utilizados para la calibración del modelo y los siguientes 11 años para la validación, como se muestra en el ANEXO 2.

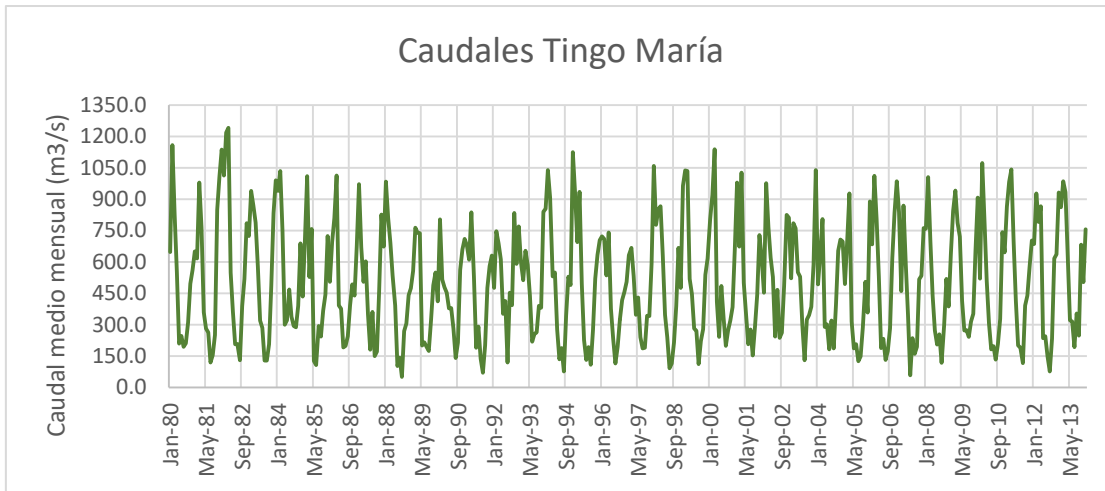


Figura 31. Serie temporal de caudales en Tingo María. Fuente: ANA, 2015.

7.2.4.2 Cálculo de la Evapotranspiración

Para el cálculo de la Evapotranspiración Potencial se utilizó el método de Thornthwaite, ya que solo requiere información de temperatura a escala mensual como parámetro de entrada (Lavado et al., 2011). El valor de la evapotranspiración depende de la temperatura media en °C y el índice de calor anual I , calculado a partir del índice de calor mensual como se muestra en la Ecuación 3.1.

$$e = 16 \times \left(\frac{T_m}{I}\right)^a \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$I = \sum i_j ; j = 1, \dots, 12$$

$$i_j = \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1.514}$$

Asimismo, se establece una relación proporcional entre la temperatura media y el coeficiente exponencial a (Chereque, 1989) a partir de la Ecuación 3.2.

$$a = 0.000000675 \times I^3 + 0.0000771 \times I^2 + 0.01792 \times I + 0.49239 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Al valor final obtenido, se le aplica el factor de corrección L , que depende del número de días del mes y horas de luz, así como la latitud (Chereque, 1989). En este caso, se aplicaron los factores de la Figura 33.

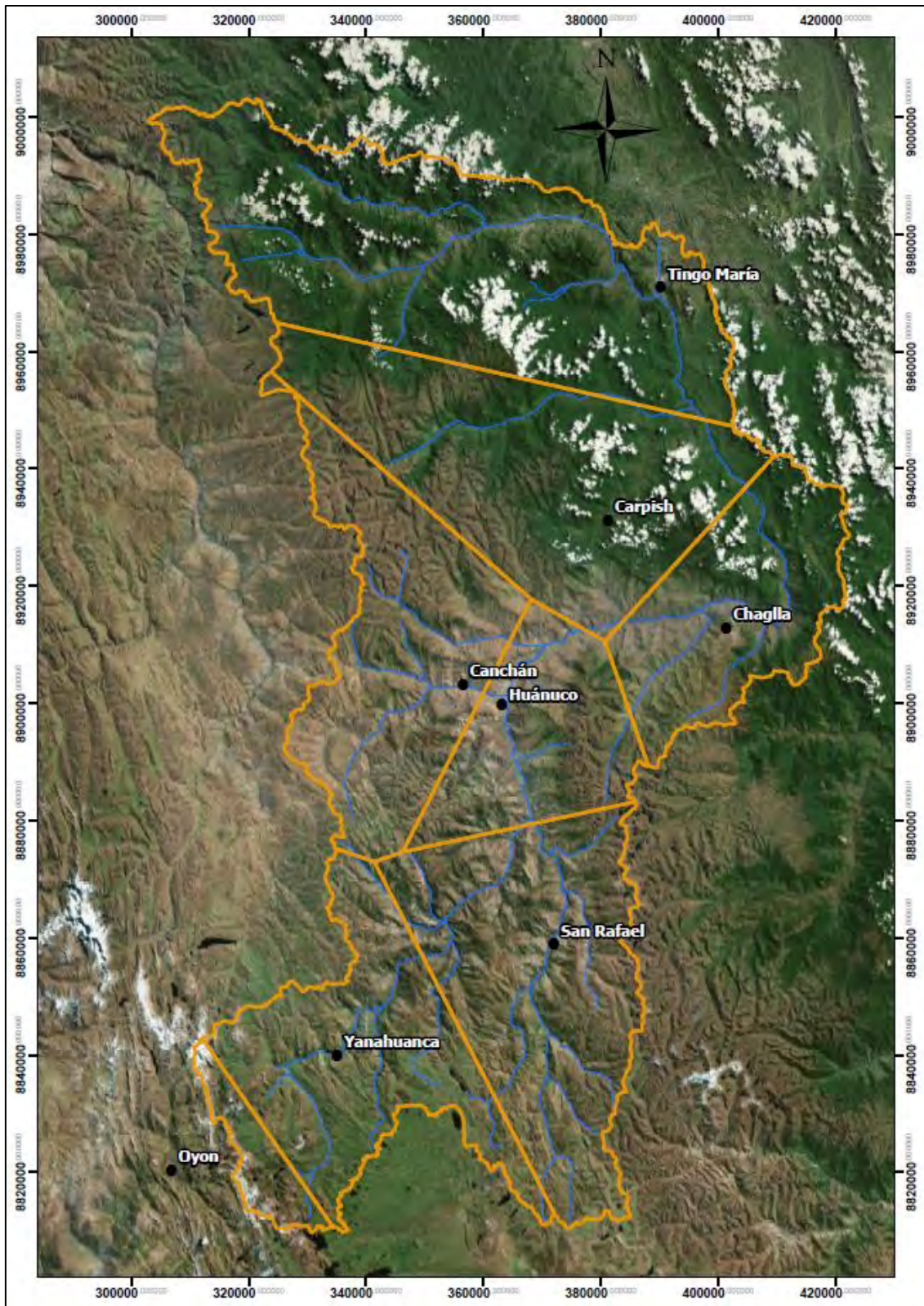


Figura 32. Polígonos Thiessen generados para cada estación meteorológica. Fuente propia.

Latitud Sur	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
5	1.04	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1.00	1.15	1.20	1.29
45	1.31	1.10	1.07	0.91	0.81	0.71	0.78	0.90	0.99	1.17	1.26	1.36
50	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41

Figura 33. Factores de corrección para evapotranspiración. Fuente: Chereque, 1989, p.57.

Se puede observar que los valores finales de evapotranspiración dentro de la cuenca fluctúan entre los 60 a 90 mm mensuales como se observa en la Figura 34.

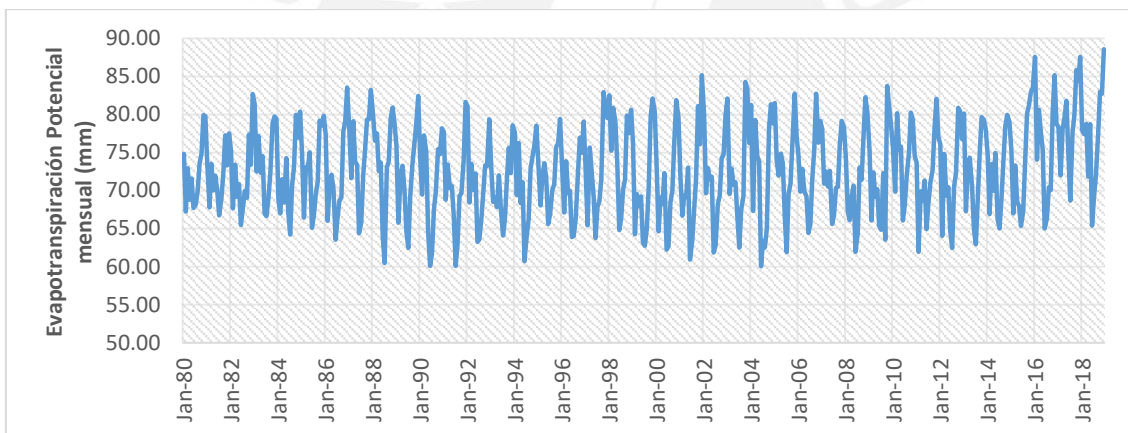


Figura 34. Valores de Evapotranspiración de la Intercuenca Alto Huallaga calculados. Fuente propia.

7.2.4.3 Proceso de Calibración y Validación del modelo GR2M

El proceso de calibración se realiza para poder ajustar el modelo a las condiciones reales del sistema (SENAMHI, 2015) a partir de parámetros que simulen con mayor precisión la serie observada de caudales (Carvajal y Roldán, 2007). Los parámetros obtenidos dentro del modelo deben representar el comportamiento físico del fenómeno y deben tener similitud con las condiciones reales de la cuenca para otorgarle capacidad explicativa (Herrera, 2015).

Los parámetros calibrados dentro del modelo serán X1 (capacidad máxima de almacenamiento de agua en reservorio de producción) y X2 (coeficiente de intercambio de agua subterránea); los cuales, se recomienda iniciar con X1=6 y X2=1 (Perrin, 2003). Para la calibración del modelo se utilizó el criterio de Nash y Sutcliffe, establecido, de manera arbitraria, como criterio de eficiencia por el modelo GR2M debido a su uso generalizado en cuencas (Makhlouf y Michel, 1994) y el coeficiente de determinación R2. Ambos han sido establecidos por el modelo como los que brindan mayor eficiencia en el proceso de calibración y validación.

12.2.4.3.1. Eficiencia de Nash-Sutcliffe

El criterio de Nash-Sutcliffe define cuánto de la variabilidad de los datos observados han sido explicados por el modelo (Cabrera, 2012). Los valores varían desde negativos a 1; en este caso, serán representados por porcentajes en donde el 100% indica un ajuste perfecto entre los valores simulados y los observados, como se muestra en la Tabla 15. La ecuación que define la eficiencia y rendimiento del modelo según Nash-Sutcliffe se presenta en la Ecuación 4.1 en donde Qobs es el caudal observado y Qsim, el caudal obtenido.

Tabla 15. Clasificación de coeficientes de ajuste Nash-Sutcliffe. Fuente: SENAMHI, 2017, p. 13.

NASH	AJUSTE
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy Bueno
>0.8	Excelente

$$Nash (\%) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right] \quad (\text{Ec. 4.1})$$

12.2.4.3.2. Coeficiente de determinación (R²)

El coeficiente de determinación se expresa como el cuadrado del coeficiente de correlación que varía desde 0 hasta 1 (SENAMHI, 2016), siendo 1 indicador de máxima similitud entre los valores observados y simulados del modelo. El coeficiente se expresa a partir de la covarianza de los valores observados y calculados Cov(Qo,Qs), y la

desviación típica de valores observados $S_d(Q_o)$ y valores calculados $S_d(Q_s)$ (Mena, 2010) como se observa en la Ecuación 4.2.

$$R^2 = \frac{Cov(Q_o, Q_s)}{S_d(Q_o) \times S_d(Q_s)} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Luego del proceso de calibración de datos se realiza la validación del modelo con el objetivo de verificar la confiabilidad de la información (Herrera, 2015). Para el proceso se aplican los mismos parámetros utilizados en la calibración, pero en otro periodo de registro de caudales de la cuenca. En este caso, se utilizarán los valores desde 1980 al 2002 para la calibración de datos, y desde el año 2003 al 2013 para la validación de estos.

8. CAPÍTULO VIII: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Resultados de pérdida de suelos

8.1.1 Mapa de factor R (erodabilidad de lluvia), Mapa de Factor K (erodabilidad del suelo) y Factor topográfico LS

El mapa de Factor R de la Figura 35 representa la distribución de la agresividad pluvial en toda la superficie de la cuenca. En este caso, se elaboró un solo mapa que se asumirá como constante para el análisis de erosión de los 4 años en estudio. Los valores más altos se encuentran en la zona de bosques ubicados en la ceja de selva del departamento de Huánuco, con valores máximos de 1964 MJ-mm/ha h/año en la ciudad de Tingo María, en la provincia de Leoncio Prado. Los valores más bajos del Factor R se encuentran en la sierra altoandina, en las partes más altas de la cuenca, que pertenecen a la región de Pasco y las provincias de Ambo y Huánuco con valores cercanos a 131.02 MJ-mm/ha h/año.

Se puede observar que el factor de agresividad pluvial es directamente proporcional a la precipitación media; por lo tanto, las zonas expuestas a grandes periodos de lluvia como la Amazonía peruana, tendrán mayor efecto erosivo. Por ejemplo, en la ciudad de Tingo María la precipitación anual registrada es 3446.4 mm y posee mayor agresividad pluvial, en comparación con la registrada por la estación San Rafael, ubicada en la provincia de Ambo, igual a 708 mm.

El mapa de Factor K fue elaborado con el mapa de suelos del mundo de la FAO ya que hasta el momento no existen valores de erodabilidad de suelos a nivel regional para Perú. Se deben realizar estudios de campo dentro de la cuenca para corroborar los

parámetros de suelo más importantes que definen la erodabilidad como el porcentaje de arena, arcilla, limo y materia orgánica.

El factor K indica la susceptibilidad del suelo a sufrir procesos de erosión según sus características edáficas, en donde los valores cercanos a 0 indican poca erodabilidad y los valores cercanos a 1 representan zonas con alta posibilidad de erosionarse. Según los resultados mostrados en la Figura 36, existe una alta homogeneidad en el tipo de suelo de la cuenca ya que los valores de erodabilidad fluctúan entre 0.0252 – 0.0732 y no se observa una alta variabilidad. Los valores más altos del factor K son 0.0732 y 0.0642 y fueron calculados en suelos franco-arenosos con poca cantidad de partículas finas y bajo porcentaje de materia orgánica. Estas condiciones originan que el suelo sea más vulnerable al desprendimiento de partículas ya que poseen menor cohesión y no desarrollan gran vegetación. Los valores menores del Factor K, en este caso igual a 0.0252, se encuentran en suelos arcillosos ubicados en la zona selva de la cuenca y el contenido de materia orgánica es mucho mayor que los suelos ubicados en la sierra; lo cual disminuye su poder erosivo.

En la Figura 37 se muestra el factor LS que indica la incidencia de la topografía sobre los procesos de erosión. El mapa de factor LS muestra valores mayores en las zonas con altas pendientes y gran altitud, especialmente en zonas montañosas a lo largo de toda la cuenca. Los valores menores que oscilan en el rango de 0 a 5 describen las zonas con perfiles planos y pendiente cercana a 0° como bofedales ubicados en la región Puno, las zonas urbanizadas y ciudades y los ríos principales, en este caso, el río Huallaga.

8.1.2 Mapa de factor C (manejo del suelo y cobertura vegetal)

El parámetro C representa la cantidad de cobertura vegetal, el tipo de vegetación y el uso que se le otorga al suelo. Dentro de la cuenca se identificaron 8 tipos de cobertura prioritarios a partir del índice NDVI a los cuales se les otorgó un valor del factor C entre 0 y 1, en donde 0 representa los suelos protegidos y con frondosa cobertura y 1, los suelos desnudos en donde se intensifica la probabilidad de procesos erosivos.

Los valores más bajos del factor C fueron asignados a los bosques de montaña con 0.001 y a las zonas desboscadas en donde se realizan labores agropecuarias de manera permanente con 0.086, ubicadas en la parte amazónica de la cuenca, ya que son tipos de cubierta que protegen el suelo. Por otro lado, se asignó el valor de 1 a

zonas urbanas identificadas como ciudades o pueblos, ya que el suelo en estas superficies se encuentra parcial o totalmente desnudo debido a la influencia antrópica. Para los elementos identificados como glaciares, nubes y cuerpos de agua, se asignó el factor C igual a 0 ya que no se considera dentro del estudio por no poseer impacto erosivo.

La Figura 38 muestra el mapa del factor C para el año 1990 en donde se puede observar que gran parte de la superficie está cubierta por bosques y las zonas más cercanas al río Huallaga se encuentran rodeadas de zonas agrícolas y matorrales. En comparación con el año 1990, el mapa del factor C en el año 2005 nos muestra una disminución del área boscosa y aumento de zonas agrícolas, especialmente en la provincia de Huánuco. Asimismo, se puede observar mayor cantidad de zonas con matorrales arbustivos característicos de la cordillera en la Sierra del Perú. En el año 2014 el factor C muestra una mayor expansión del suelo dedicado a la agricultura y grandes sectores con pajonal andino. Se puede observar que existe disminución de áreas boscosas y aumento de superficies con valores de factor C entre 0.13 y 0.435 indicando el cambio de uso de suelo hasta el año 2014. Finalmente, el mapa del factor C en el año 2017 muestra el aumento de zonas en bosques que han sido intervenidos, ya que poseen valores cercanos a la unidad del factor C, aumentando la susceptibilidad del suelo a procesos erosivos.

8.1.3 Mapa de pérdida de suelo en los años 1990, 2005, 2014 y 2017

Los resultados obtenidos de tasa de pérdida de suelos (ton/ha/año) se observan en la Figura 42 para el año 1990, Figura 43 para el año 2005, Figura 44 para el año 2014 y Figura 45 para el año 2017. Se ha clasificado el grado de erosión de la cuenca según la Tabla 16 para evaluar la intensidad de remoción de suelo anual y poder relacionarla con los valores de escorrentía presentes en la cuenca. Los rangos establecidos para cada grado de erosión son propuestos como alternativa de clasificación, para realizar una comparación general entre cada año.

Tabla 16. Clasificación del grado de erosión de la pérdida de suelo.

Pérdida de suelo (ton/ha/año)	Grado de erosión
0-10	Ligero
10-50	Moderado
50-100	Alto
100-200	Muy alto
>200	Severo

La interpretación del grado de erosión y su variabilidad desde el año 1990 hasta el 2017 se muestra en la Tabla 17, en donde se ha clasificado cada zona en función del porcentaje de área que representa de la cuenca.

En el año 1990 podemos observar que el 50.07% del área total de la cuenca posee un grado de pérdida de suelos de 0 a 10 ton/ha/año predominante en la zona de bosques. Asimismo, los valores de erosión entre 10-50 ton/ha/año representan el 33.43% de la cuenca en zonas con cobertura vegetal de bofedales, matorrales y pajonales andinos. Los valores de erosión mayores a 50 ton/ha/año considerados como grados de erosión altos o severos representan solo el 16.18% en zonas con escasa vegetación.



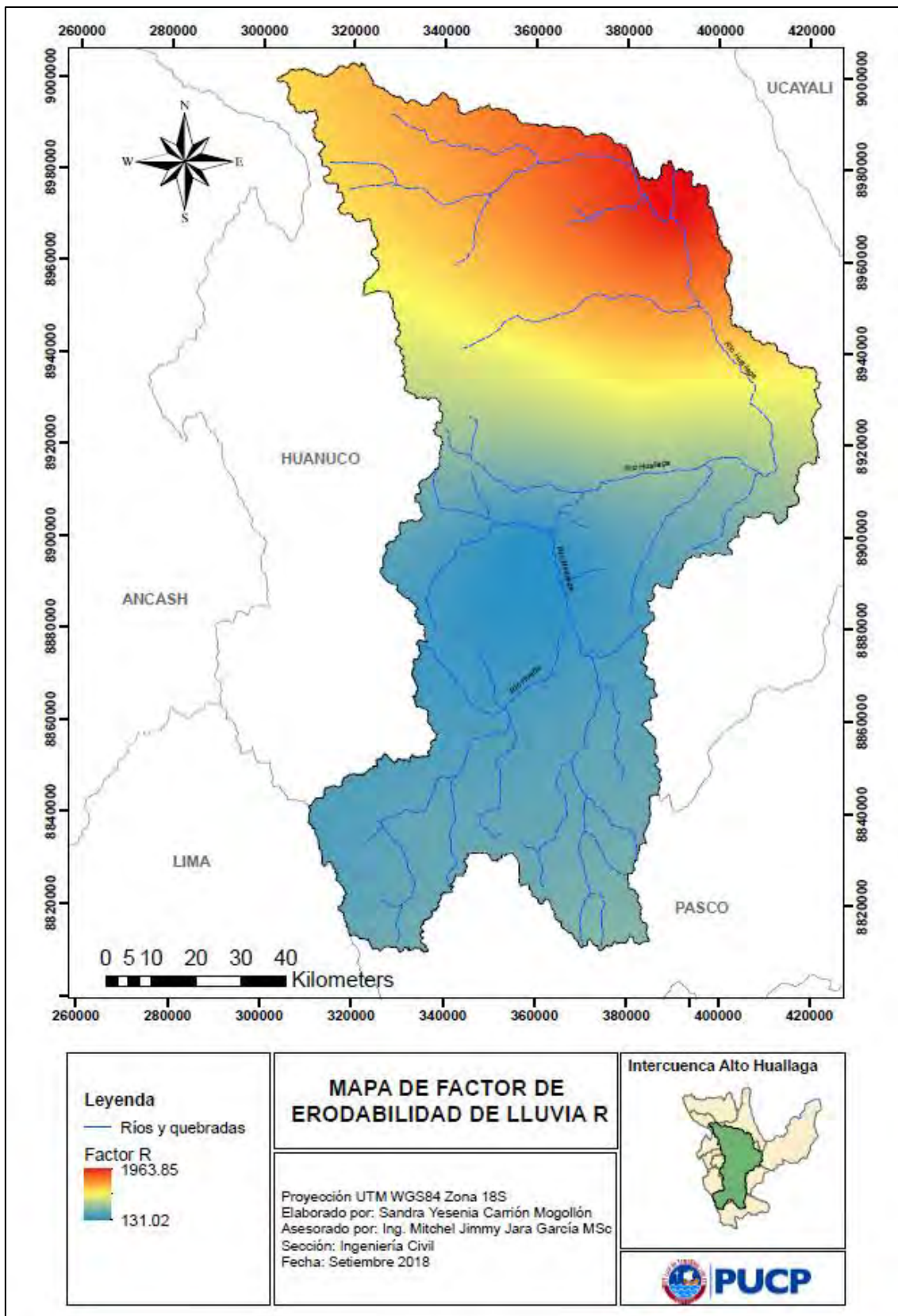


Figura 35. Mapa de Factor R de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

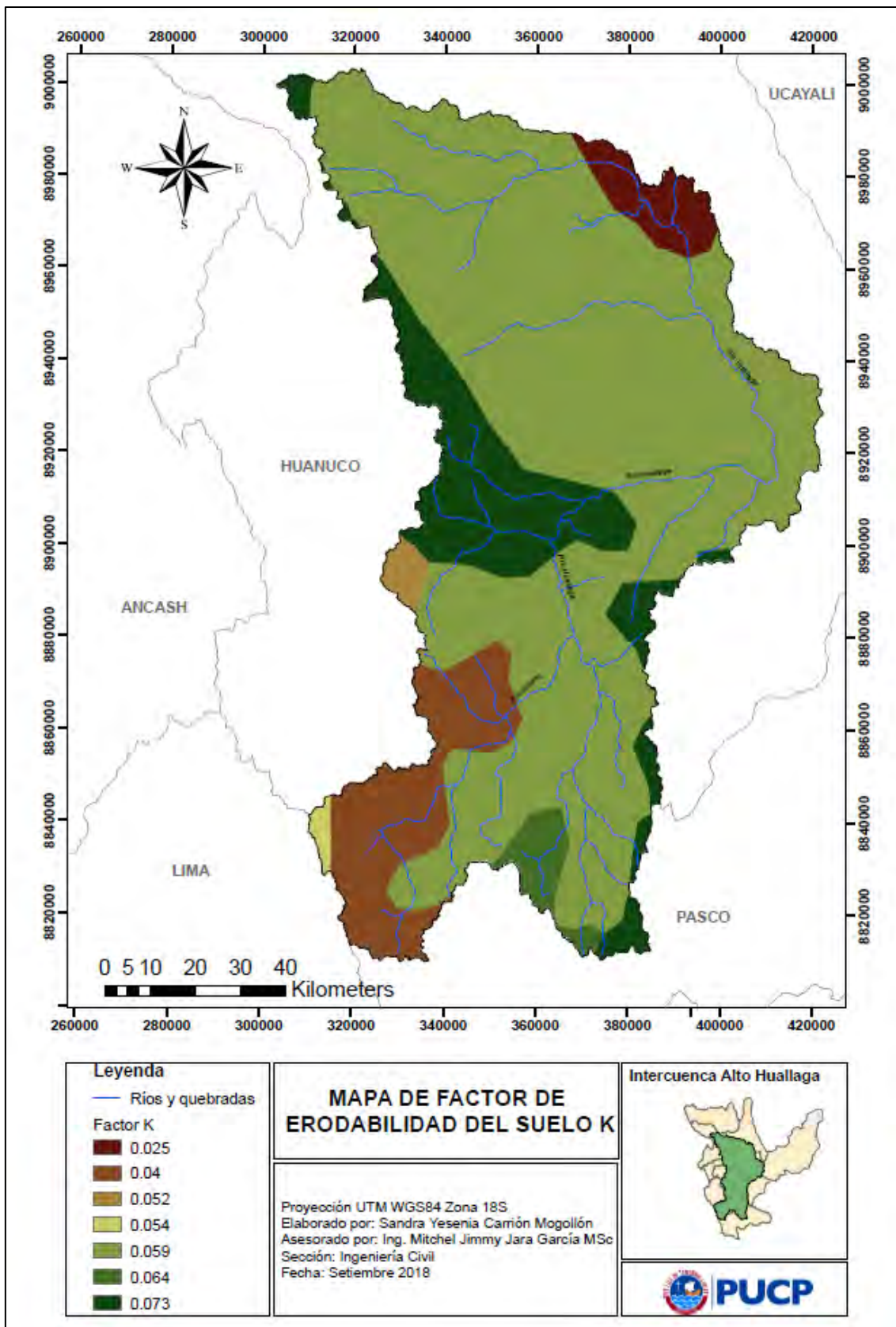


Figura 36. Mapa de Factor K de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

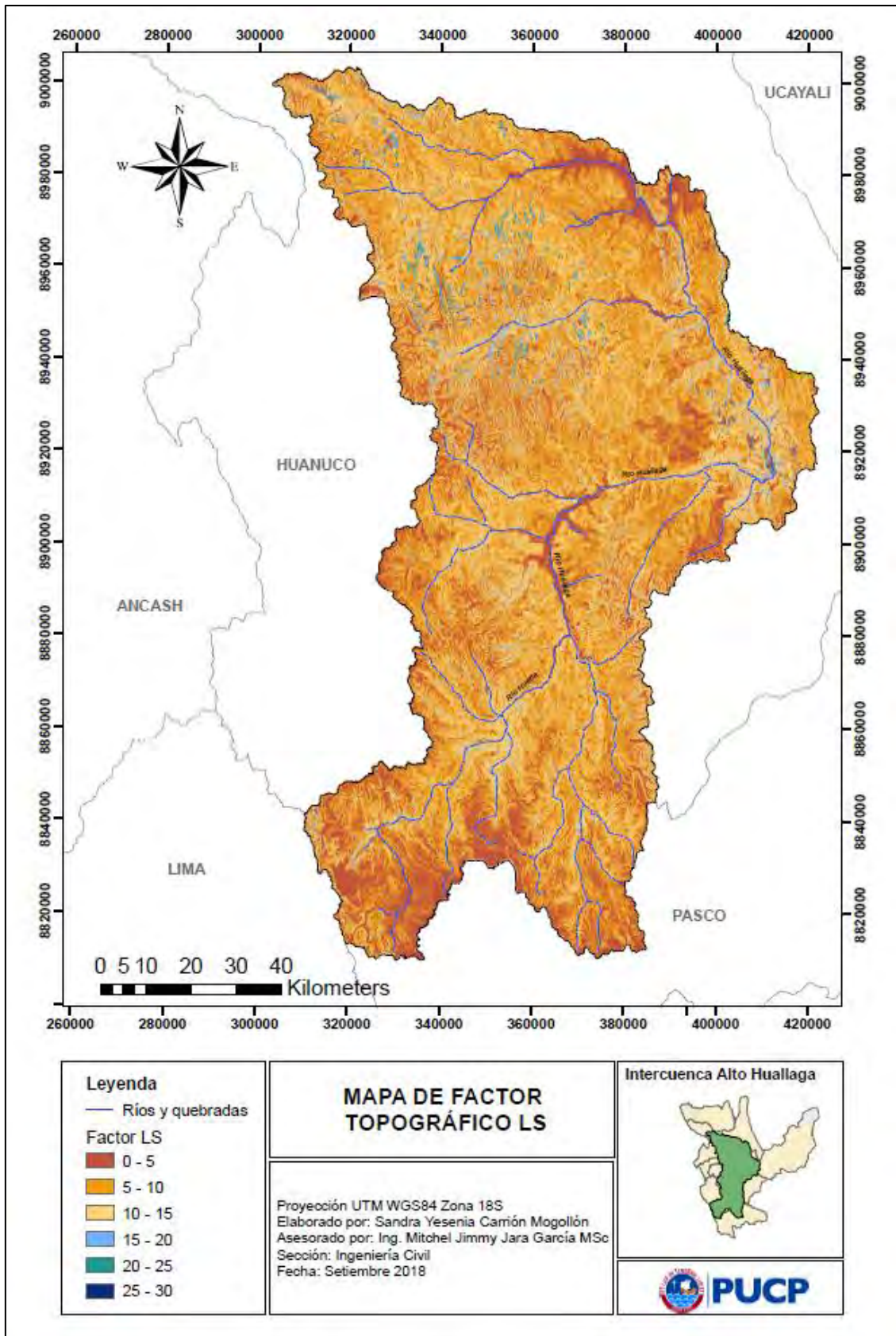


Figura 37. Mapa de Factor LS de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

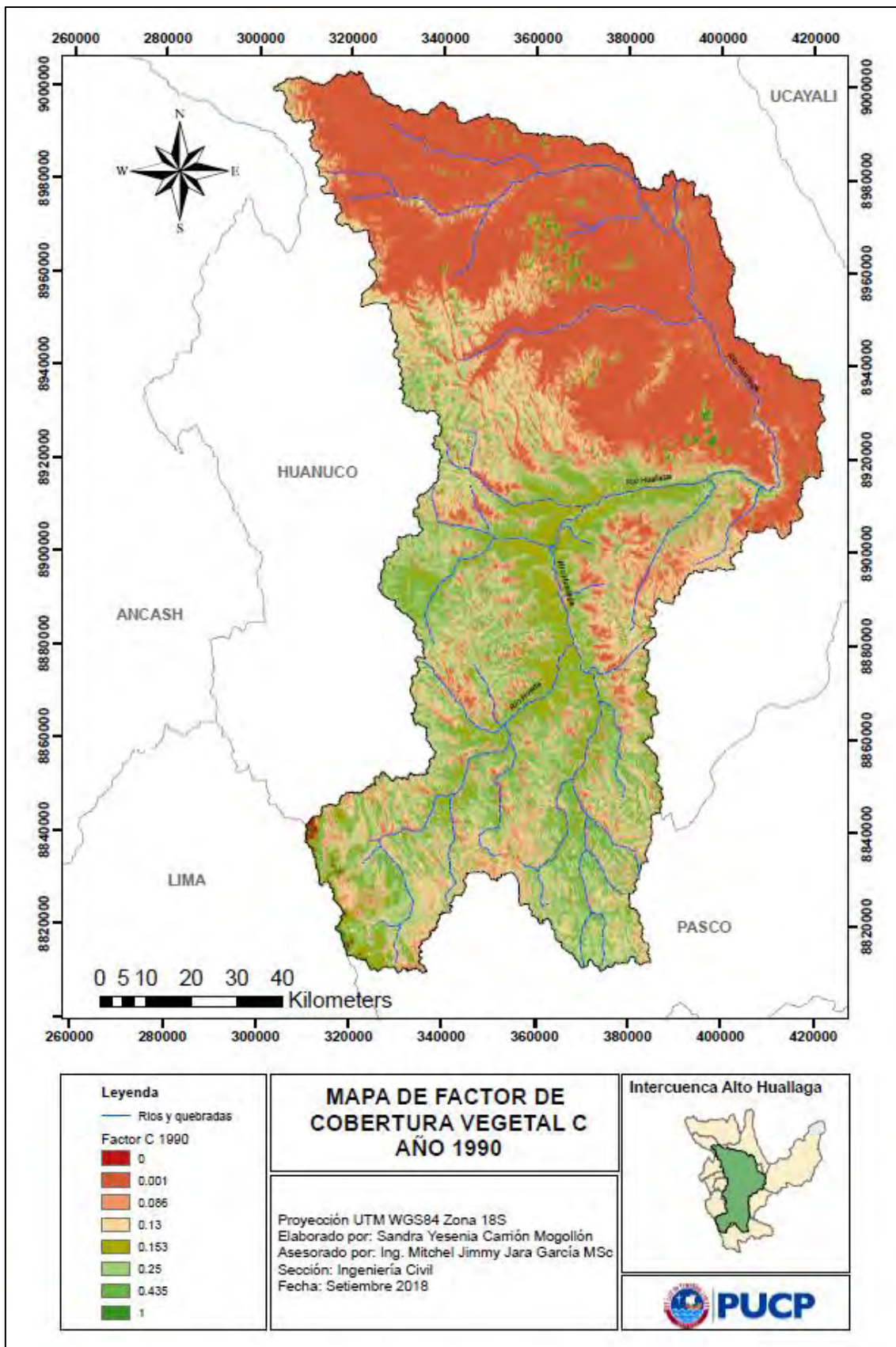


Figura 38. Mapa de Factor C para el año 1990 de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

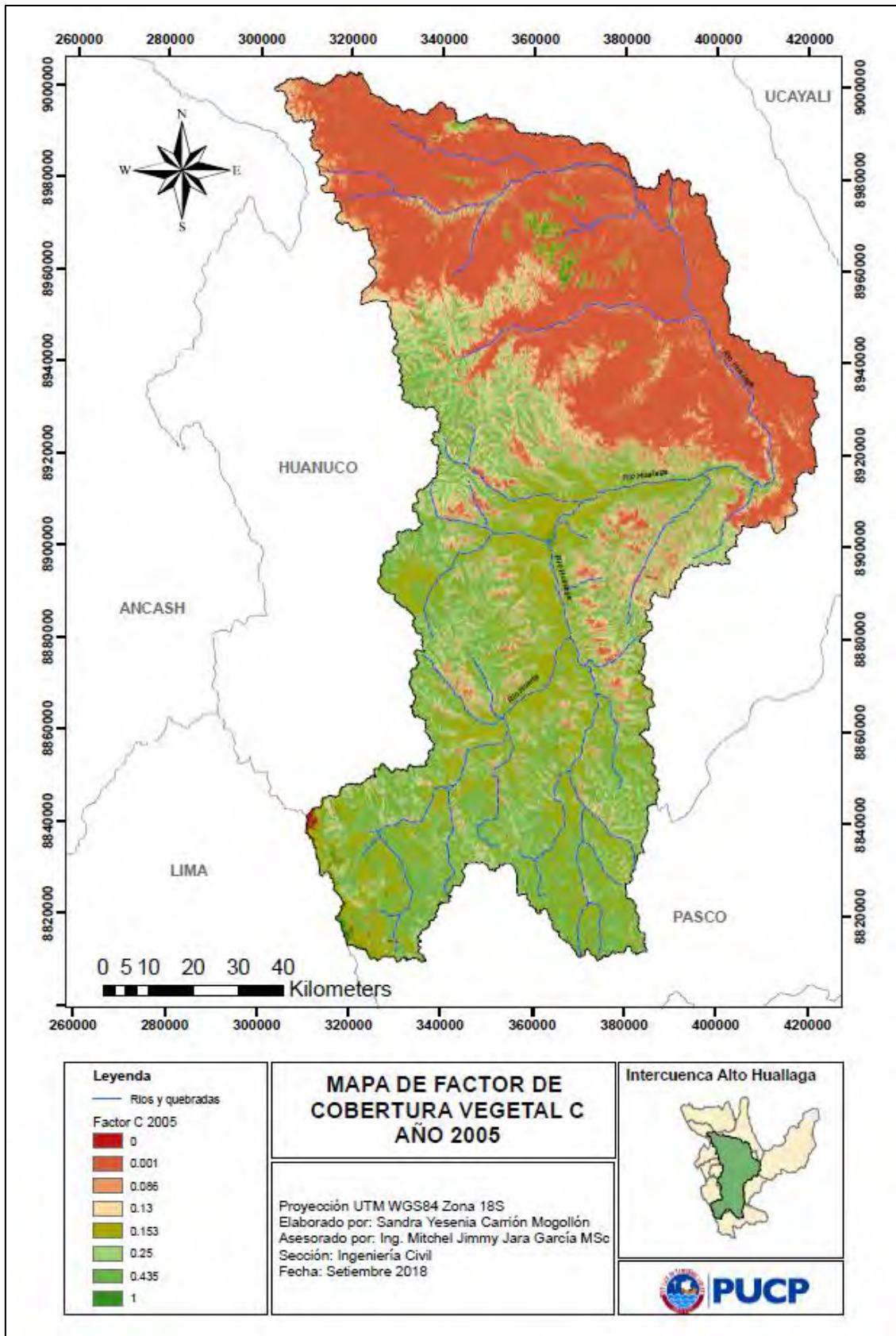


Figura 39. Mapa de Factor C para el año 2005 de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

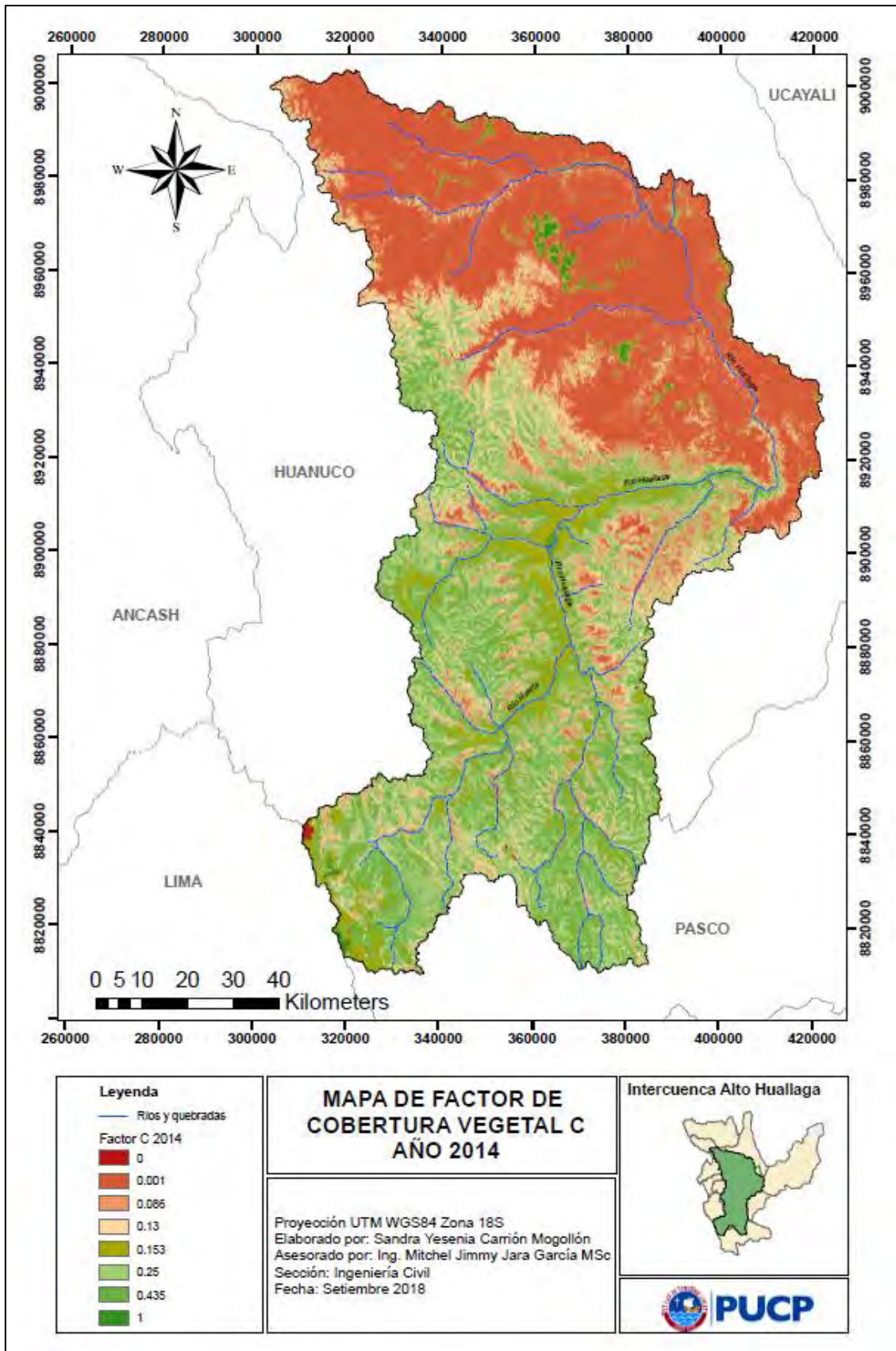


Figura 40. Mapa de Factor C para el año 2014 de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

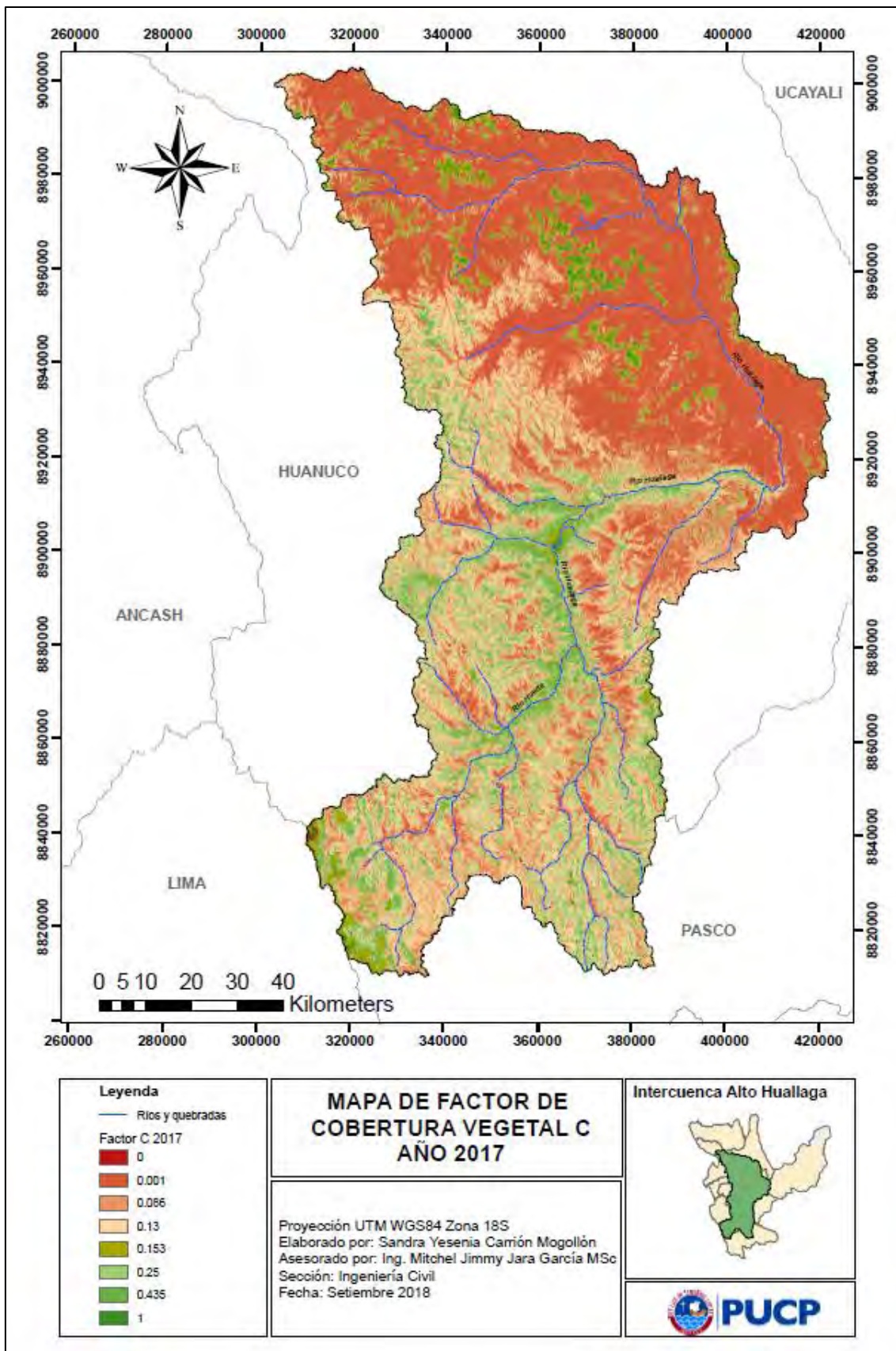


Figura 41. Mapa de Factor C para el año 2017 de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

En el año 2005 se observa que el porcentaje de erosión ligera, de 0 a 10 ton/ha/año, disminuyó a 44.23%, y los grados de erosión moderada a alta aumentaron a 34.83% y 13.39% respectivamente. La variación observada se puede definir como la intensificación de la erosión en aquellas zonas que inicialmente presentaban grados de erosión ligero. De igual manera, los valores de erosión entre 100 a 200 ton/ha aumentaron a 5.71% durante el periodo de 15 años, originando grandes pérdidas de suelo.

En el año 2014 se observó la disminución de la erosión entre 0 a 10 ton/ha hasta el 42.94% del área total y el aumento de los valores altos y muy altos de erosión en 14.70% y 5.99%. Finalmente, para el año 2017, se observa un incremento de superficies con grado de erosión ligero a 46.14% y aumento en el grado de erosión severo; sin embargo, los grados de erosión moderado y alto se conservan similares a los años anteriores. En este caso, para el año 2017, el incremento de zonas con erosión mayor a 200 ton/ha puede interpretarse como valores atípicos.

Tabla 17. Distribución de áreas según grados de erosión laminar de suelos para los años 1990, 2005, 2014 y 2017 en la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

Periodo		Ligero 0-10 ton/ha	Moderado 10-50 ton/ha	Alto 50-100 ton/ha	Muy alto 100-200 ton/ha	Severo > 200 ton/ha
Año 1990	Area (%)	50.07%	33.43%	11.02%	4.02%	1.14%
Año 2005	Area (%)	44.23%	34.83%	13.39%	5.71%	1.84%
Año 2014	Area (%)	42.94%	34.56%	14.70%	5.99%	1.81%
Año 2017	Area (%)	46.14%	34.33%	13.25%	4.17%	2.10%

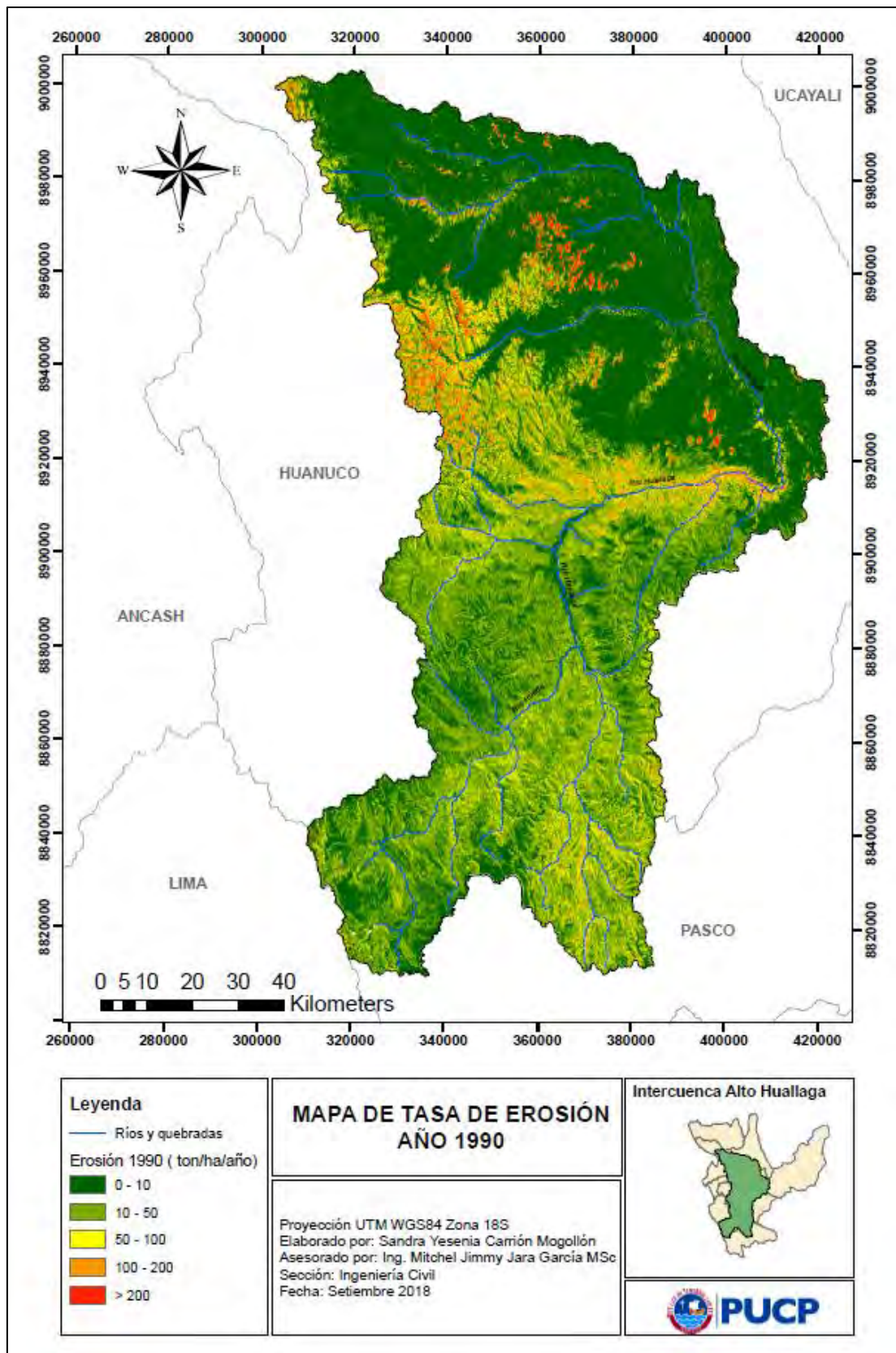


Figura 42. Mapa de Tasa de Erosión para el año 1990 en la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

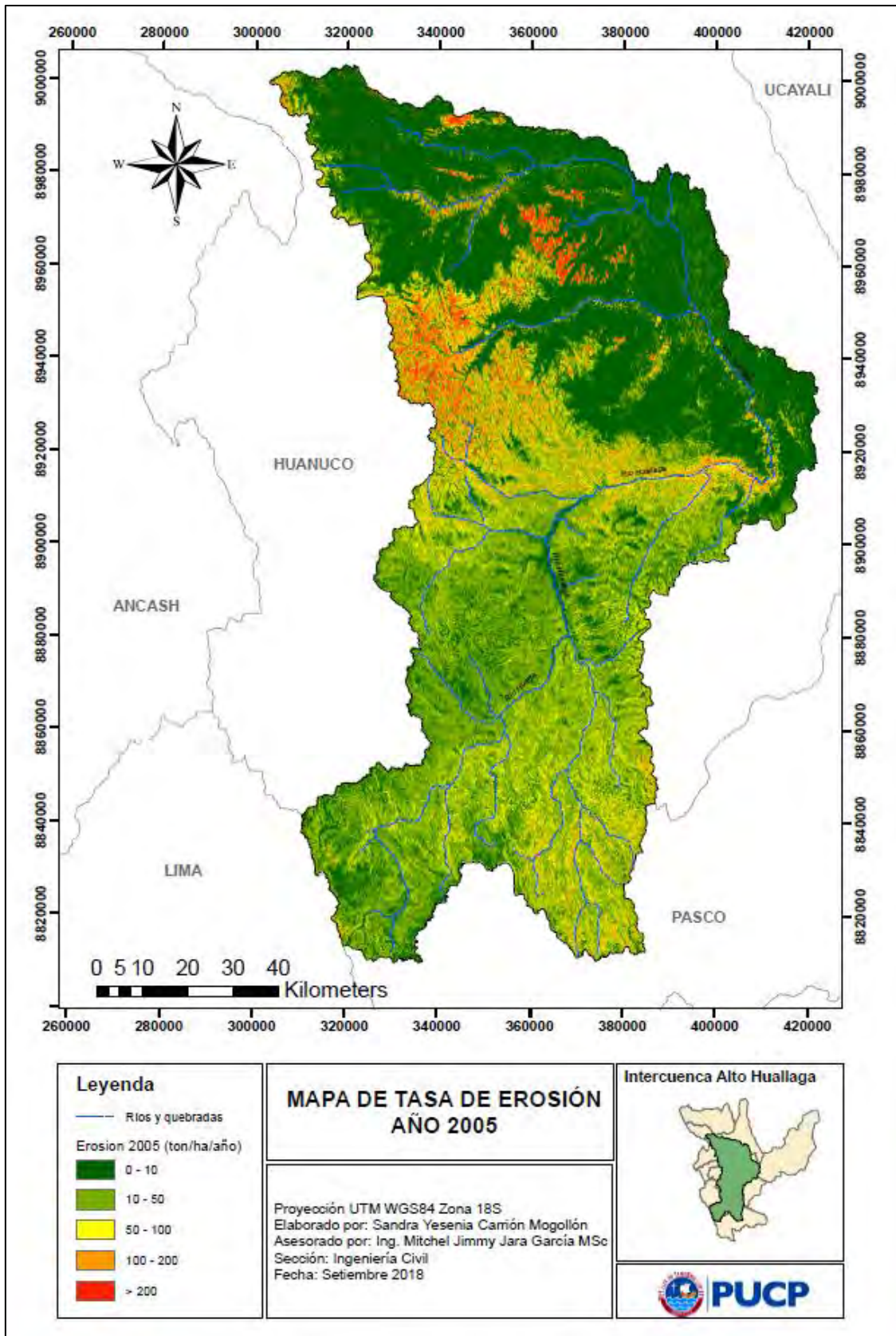


Figura 43. Mapa de Tasa de Erosión para el año 2005 en la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

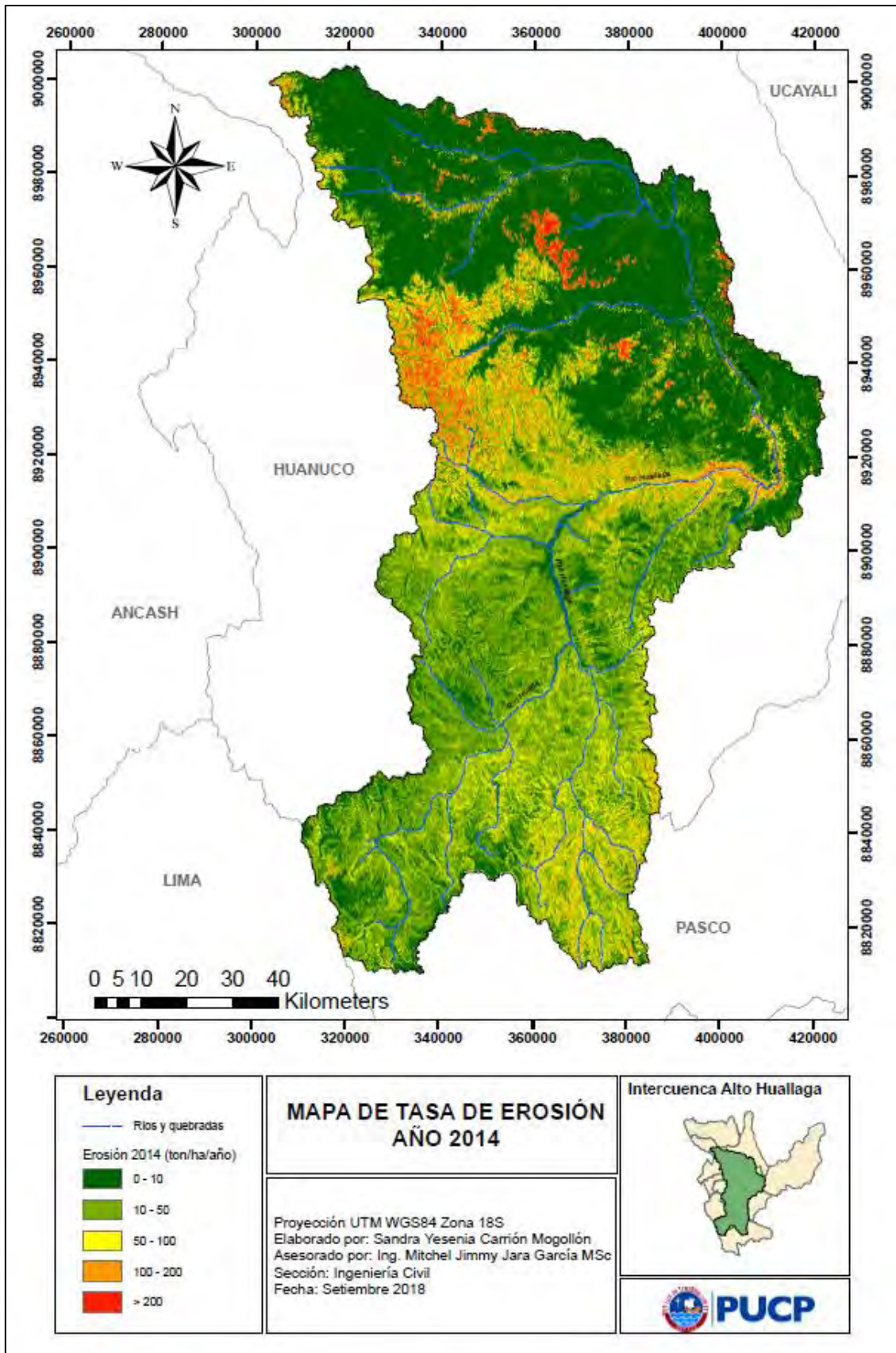


Figura 44. Mapa de Tasa de Erosión para el año 2014 en la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

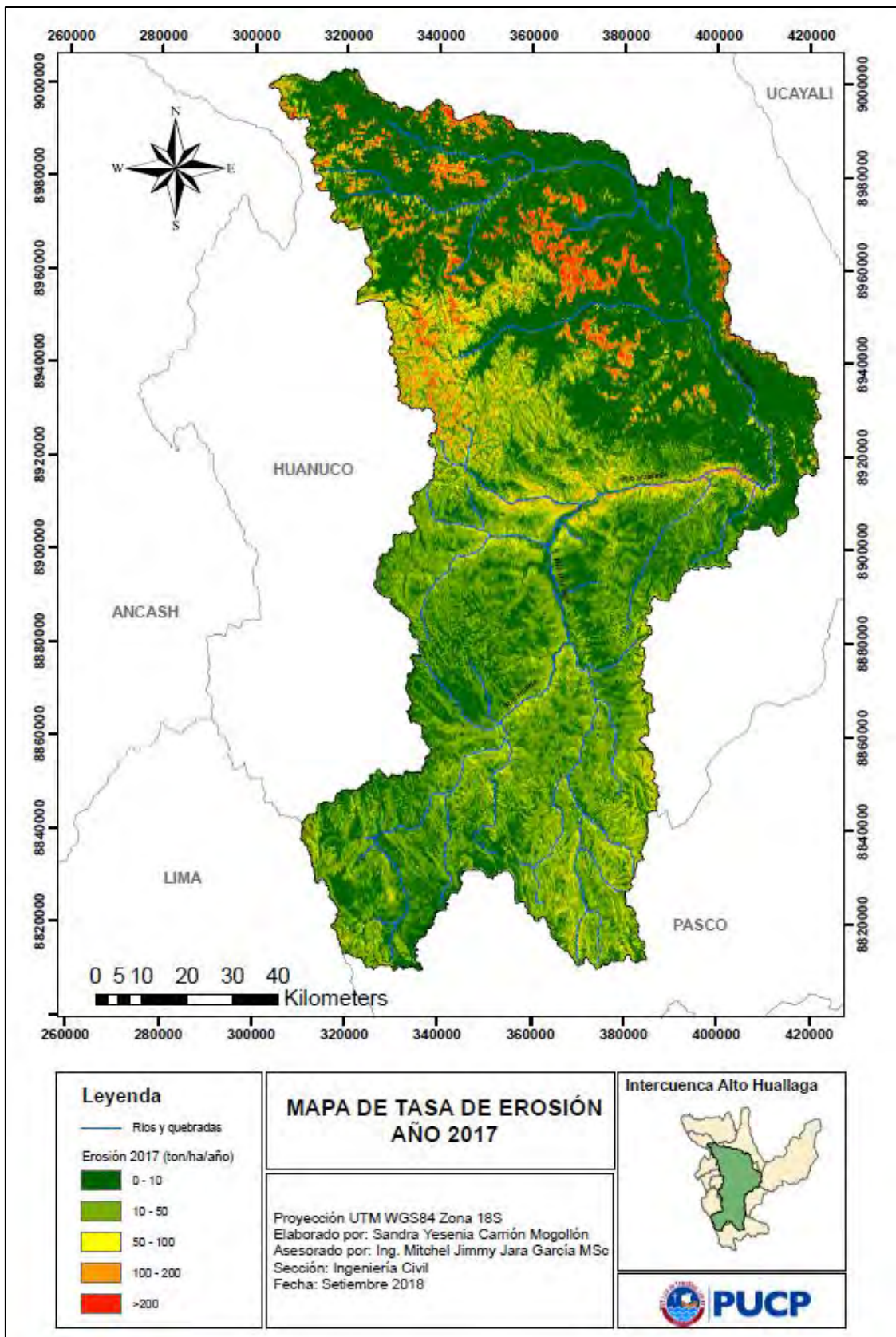


Figura 45. Mapa de Tasa de Erosión para el año 2017 en la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.

8.2. Escorrentía superficial en el área de estudio a partir del modelo GR2M

8.2.1 Proceso de Calibración

El proceso de calibración del modelo para la intercuenca alto Huallaga se realizó a partir de datos de entrada de precipitación, evapotranspiración y caudales expresados en milímetros. El periodo de calibración se realizó con el registro de datos de los años 1980-2002 y con parámetros de entrada $X1=6$ y $X2=1$. Los resultados de la calibración para los criterios de Nash-Sutcliffe y el coeficiente de determinación R^2 se ven expresados en la Tabla 18 y el resultado de los parámetros finales aplicados al modelo se ven en la Tabla 19, siendo el parámetro $X1 = 4$ y $X2=1$.

Tabla 18. Resultados de criterios de eficiencia en la Intercuenca Alto Huallaga 1980-2002. Fuente propia

Resumen Criterios de Eficiencia	
Nash	84.78
R^2	0.94

Tabla 19. Resultados de parámetros calculados en la Intercuenca Alto Huallaga 1980-2002. Fuente propia.

Nombre	Tingo María - Huallaga	
Área (km ²)	12309.14	
Parámetros del modelo	Transformado	Real
x1: Capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo (mm)	4.00	54.60
x2: Coeficiente de intercambio subterráneo (mm)	1.00	1.00

El valor obtenido por el criterio de Nash es igual a 84.78% el cual es muy cercano al 100% y, según la Tabla 15, podemos clasificar su eficiencia como excelente, lo cual nos indica que el modelo GR2M establece una gran similitud entre los caudales observados y simulados, acercándose al comportamiento real de la cuenca. De igual manera, el coeficiente de determinación es igual a 0.94 que indica una alta correlación de datos como se observa en la Figura 46. Asimismo, la Figura 48 nos muestra los datos de caudal generado y su respectiva comparación con los caudales observados.

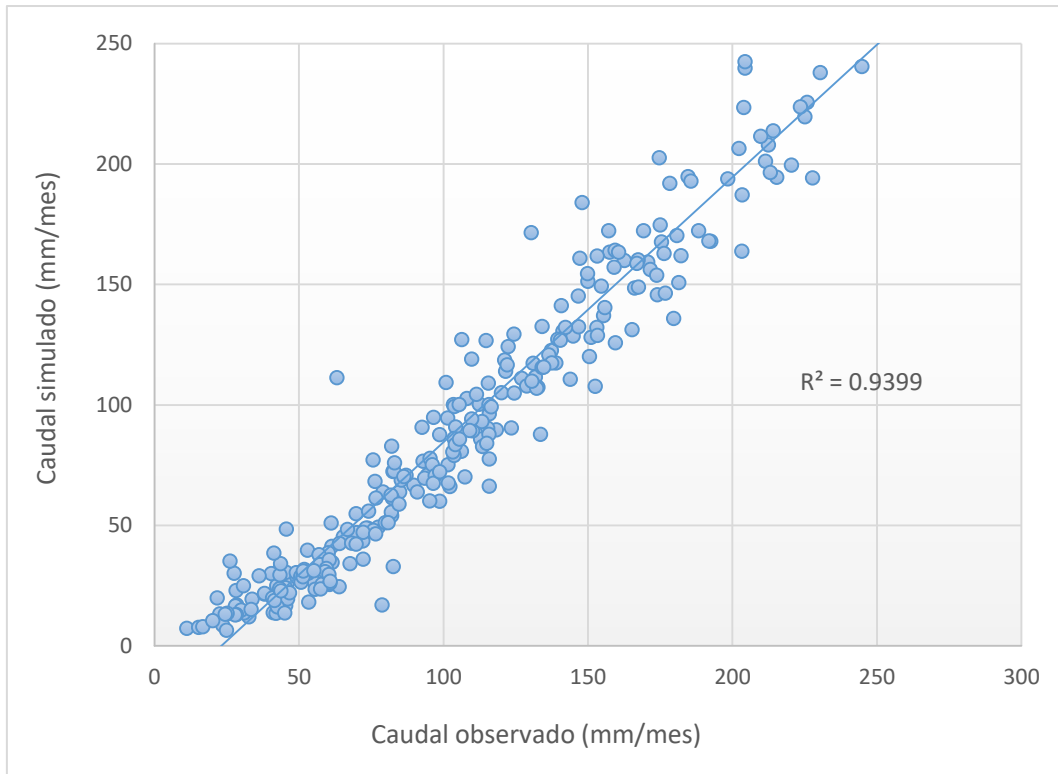


Figura 46. Correlación entre caudal generado y caudal observado - Intercuenca Alto Huallaga 1980-2002. Fuente propia.

8.2.2 Proceso de validación

El proceso de validación del modelo se realizó durante el periodo de 2003-2013 aplicando los parámetros X1 y X2 obtenidos durante la calibración. De igual manera, los resultados de los criterios de eficiencia son mostrados en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados de criterios de eficiencia- Intercuenca Alto Huallaga 2003-2013. Fuente propia.

Resumen criterios de eficiencia	
Nash	86.3
R ²	0.98

Durante el proceso de validación se obtuvo un porcentaje de 86.3% para el criterio de eficiencia de Nash que indica la alta similitud entre datos simulados y observados; lo cual, para valores de Nash mayores al 80% son considerados como excelente. Asimismo, el valor de correlación es igual a 0.98 como se muestra en la Figura 47. Finalmente, los valores de caudal estimados por el proceso de validación se muestran en la Figura 49.

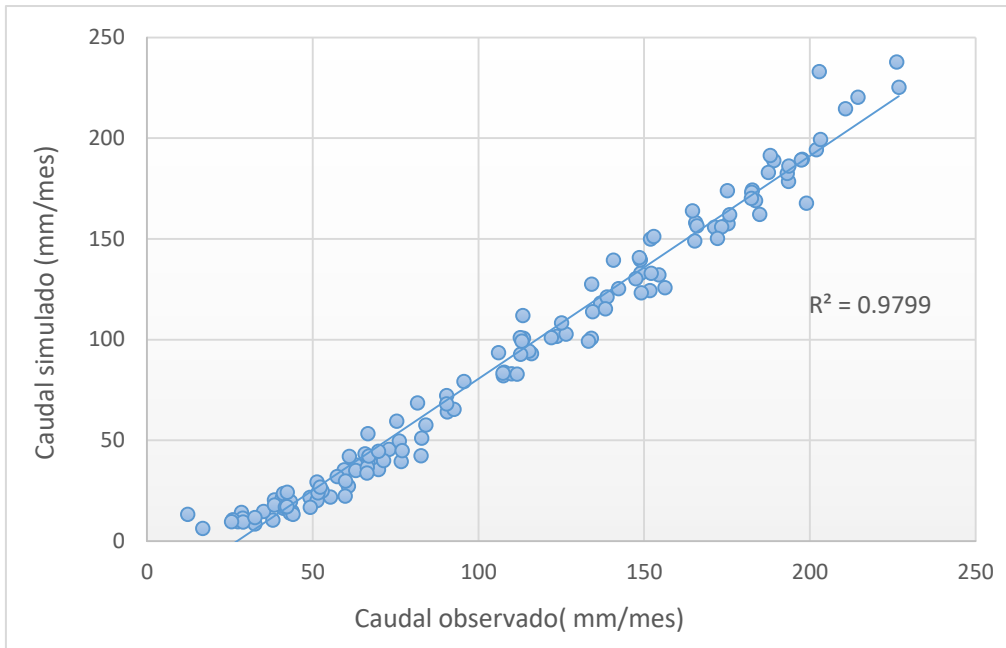


Figura 47. Correlación entre caudal generado y caudal observado - Intercuenca Alto Huallaga 1980-2002. Fuente propia.

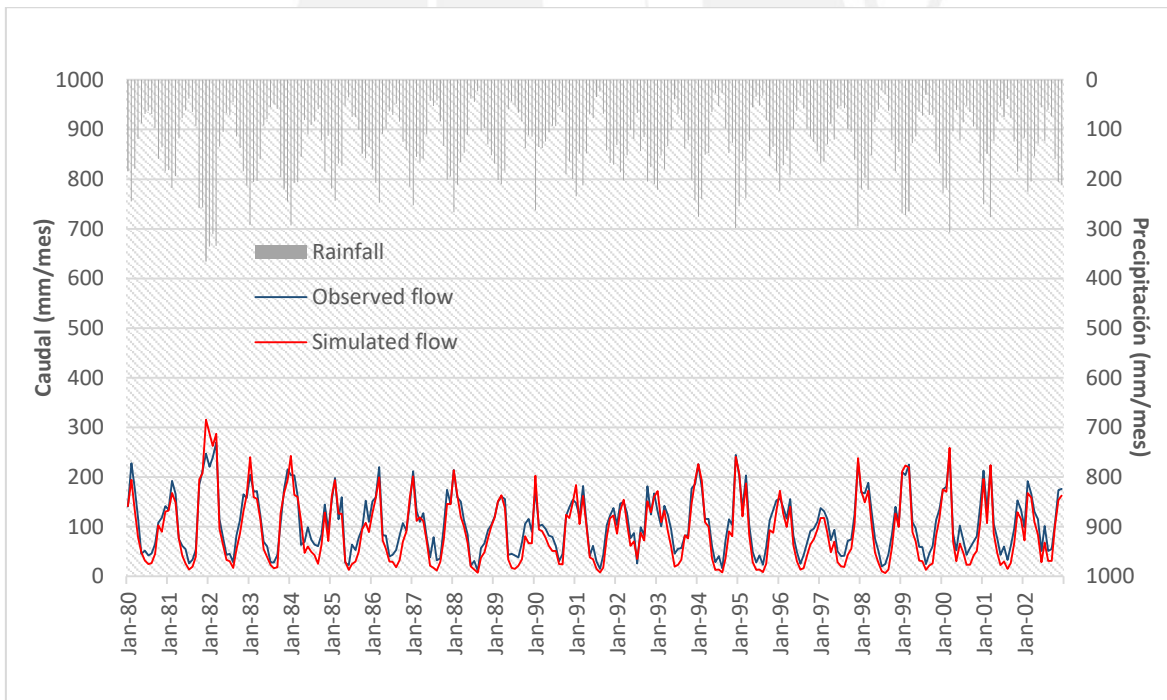


Figura 48. Caudales simulados comparados con los caudales observados - Intercuenca Alto Huallaga 1980-2002. Fuente propia.

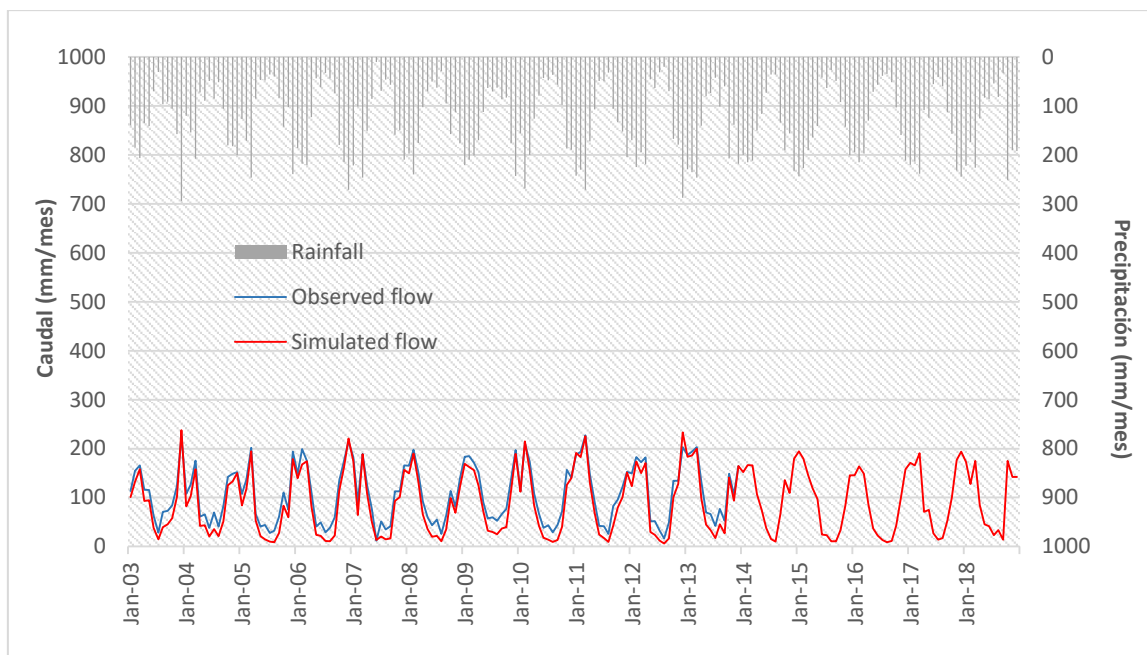


Figura 49. Caudales simulados comparados con los caudales observados - Intercuenca Alto Huallaga 2003-2018. Fuente propia.

8.3. Relación entre tasa de erosión y escorrentía superficial en Bosques montanos de la Intercuenca Alto Huallaga

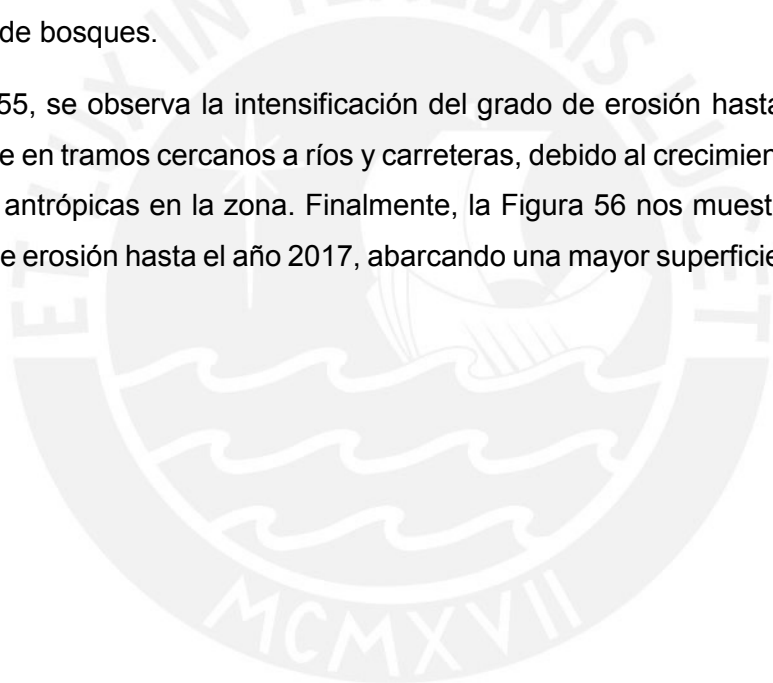
La cuenca en estudio está conformada por zonas que pertenecen a la región sierra y selva del departamento de Huánuco, abarcando una variedad de superficies de cobertura vegetal. Por lo tanto, para analizar el efecto de la erosión en los bosques de la cuenca, se ha realizado la delimitación del área boscosa para el cálculo de tasa de erosión anual.

Los bosques de montaña de la Intercuenca Alto Huallaga poseen una superficie de 508 500 ha., en donde se cuantificó la tasa de erosión para los años 1990, 2005, 2014 y 2017. La Figura 50 muestra el mapa de erosión anual en bosques para el año 1990. Asimismo, la Figura 51, 52 y 53 muestran el incremento de tasas de erosión para los años 2005, 2014 y 2017 respectivamente. En base a la clasificación del grado de erosión de bosques según la Guía para la descripción de suelos elaborada por la FAO (2009), se han representado las altas tasas de erosión con colores rojizos en los mapas, que han incrementado su área a lo largo de los años. Como se muestra en la Tabla 21, se ha cuantificado el área intervenida con diferentes tasas de erosión. Se puede observar que existe una disminución del área superficial con tasas de erosión menores a 5 ton/ha/año y, un incremento de zonas superficiales con erosión mayor a 50 ton/ha/año.

A partir de esta caracterización, se puede deducir que existe una intensificación de la degradación de bosques por problemas erosivos.

Para poder observar de manera gráfica el fenómeno mencionado, se elaboraron los mapas de variación del grado de erosión, en donde se observa la intensificación de la erosión desde el año 1990 hasta el 2017. Los mapas fueron creados restando los valores obtenidos de tasas de erosión de un año respecto a otro, para lograr identificar las nuevas áreas degradadas y aquellas en las cuales se incrementó. En la Figura 54, se muestra la variación de tasas de erosión en los primeros 15 años analizados, es decir, el incremento desde el año 1990 hasta 2005. Se observa que el aumento fue significativo en la parte baja de la cuenca, donde limita la ciudad de Huánuco con el inicio de la zona boscosa. La zona identificada se caracteriza por la expansión urbana, creación de carreteras, incremento de zonas agrícolas, etc., que contribuyen con la desaparición de bosques.

En la Figura 55, se observa la intensificación del grado de erosión hasta el año 2014, principalmente en tramos cercanos a ríos y carreteras, debido al crecimiento poblacional y actividades antrópicas en la zona. Finalmente, la Figura 56 nos muestra la variación de las tasas de erosión hasta el año 2017, abarcando una mayor superficie de la cuenca.



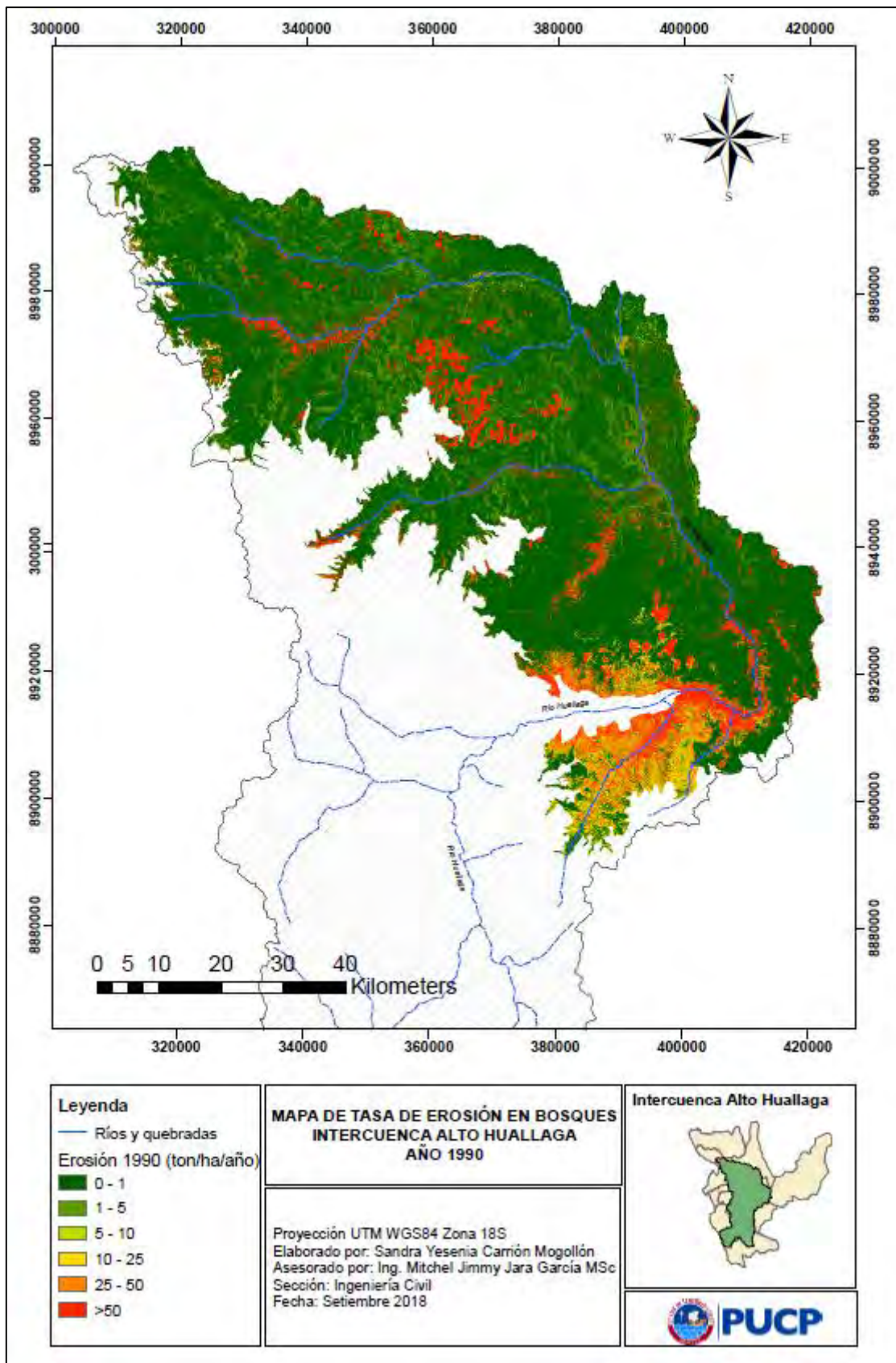


Figura 50. Mapa de tasa de erosión en bosques en el año 1990. Fuente propia.

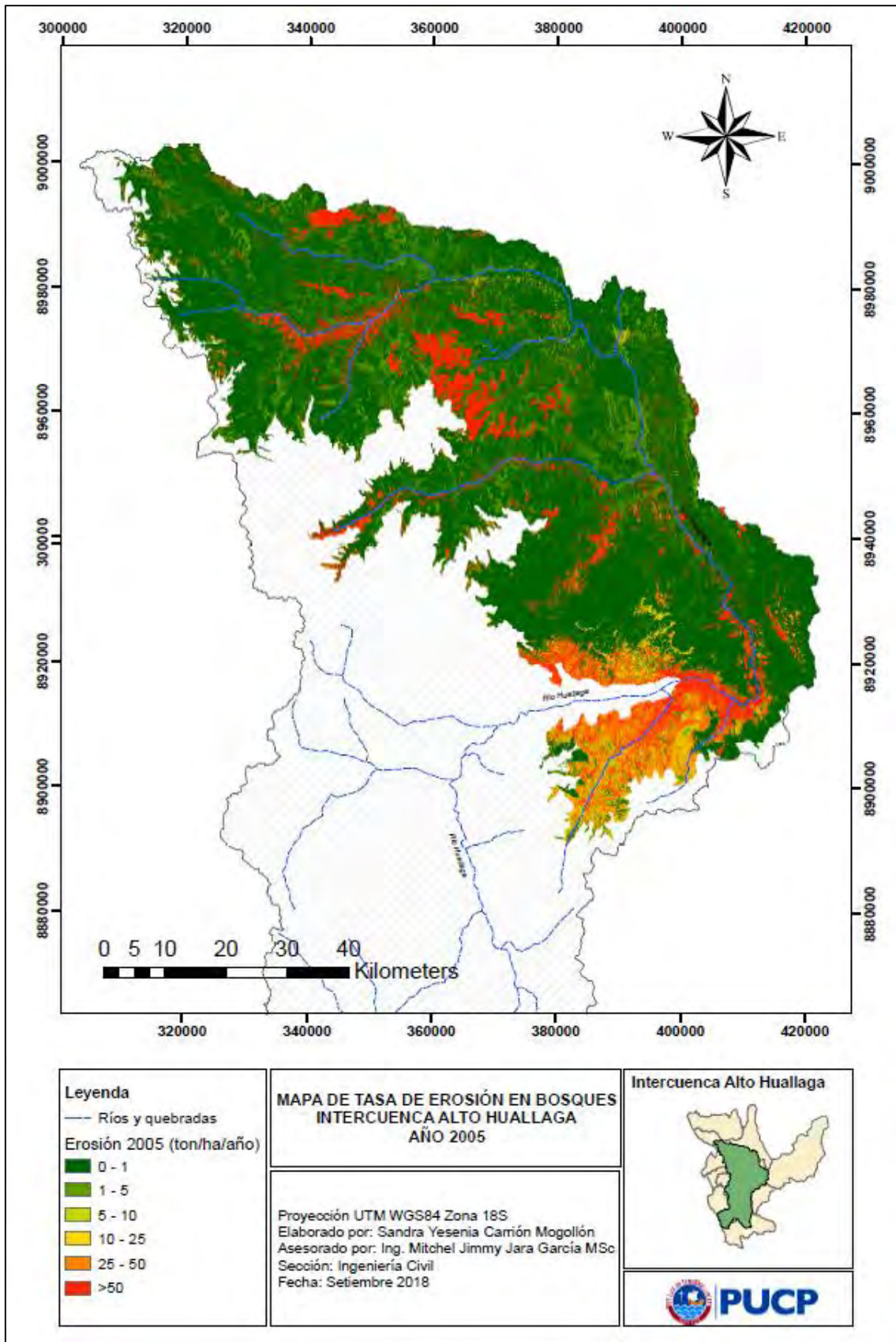


Figura 51. Mapa de tasa de erosión de bosques en el año 2005. Fuente propia.

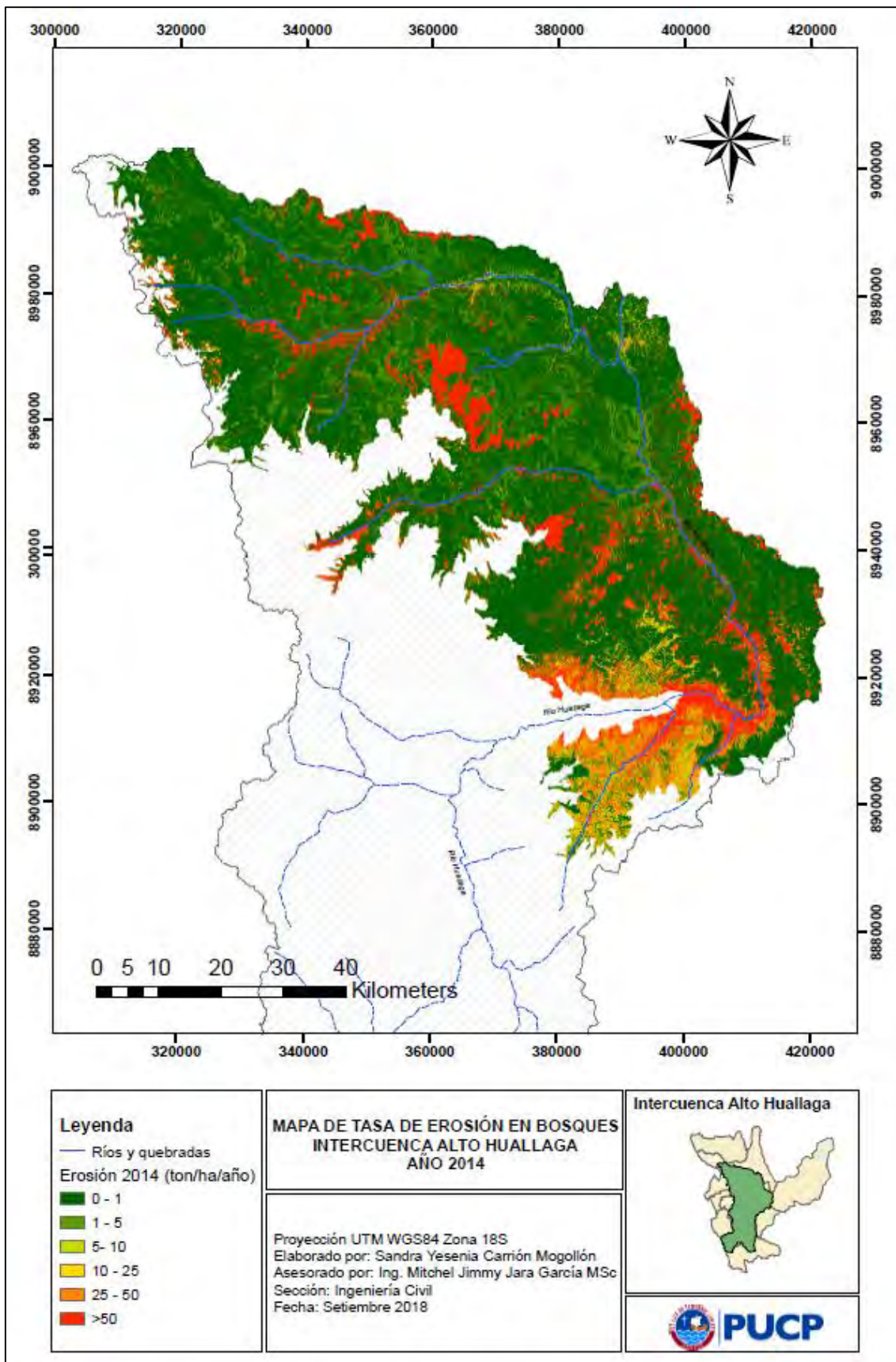


Figura 52. Mapa de tasa de erosión en bosques en el año 2014. Fuente propia.

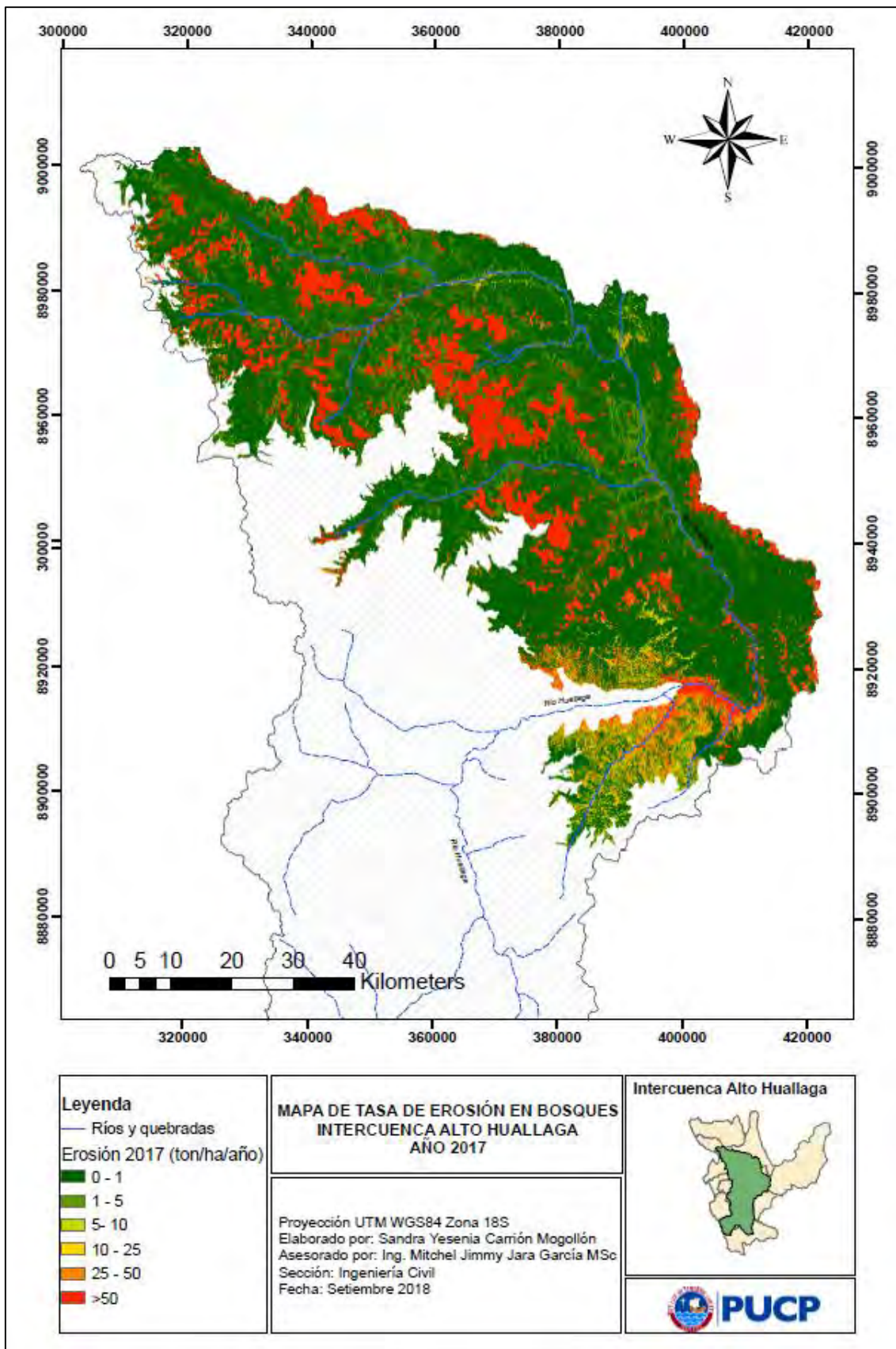


Figura 53. Mapa de tasa de erosión en bosques en el año 2017. Fuente propia.

Tabla 21. Clasificación del área afectada por erosión en Bosques en los años 1990, 2005, 2014 y 2017. Fuente propia.

		0 ton/ha	0-5 ton/ha	5-10 ton/ha	10-25 ton/ha	25-50 ton/ha	> 50 ton/ha
Año 1990	Área %	0.37%	82.89%	0.82%	3.26%	4.01%	8.64%
	ha	1884.09	421372.89	4188.74	16579.86	20369.58	43934.95
Año 2005	Área %	0.39%	80.10%	0.77%	3.29%	4.59%	10.86%
	ha	1971.476	407185.185	3906.647	16744.753	23337.180	55184.865
Año 2014	Área %	0.30%	78.79%	0.97%	3.77%	4.85%	11.32%
	ha	1543.23	400536.33	4906.27	19184.78	24631.61	57527.88
Año 2018	Área %	0.23%	77.03%	1.05%	3.38%	4.00%	14.33%
	ha	1149.43	391529.20	5334.92	17158.02	20323.88	72816.74

De igual manera, la Tabla 22 muestra los valores totales de erosión estimados en la cuenca en donde se observa un gran incremento desde el año 1990 al 2017.

Tabla 22. Erosión total (ton/año) en Bosques de la cuenca de estudio. Fuente Propia.

Año	Erosión (ton/año)
1990	8,309,207.98
2005	10,568,646.03
2014	12,320,594.52
2017	15,945,463.16

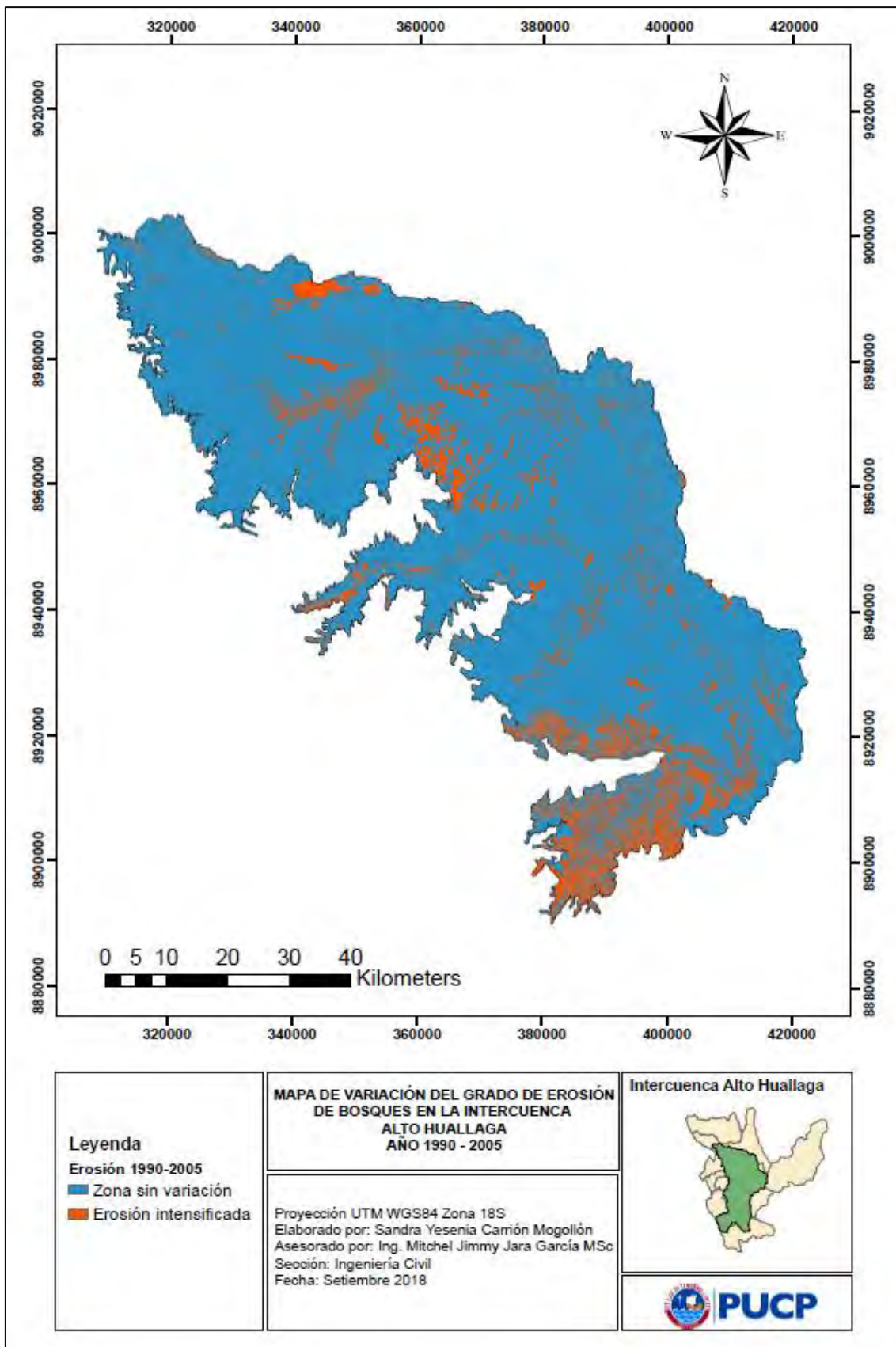


Figura 54. Mapa de variación del grado de erosión de bosques entre los años 1990 y 2005. Fuente propia

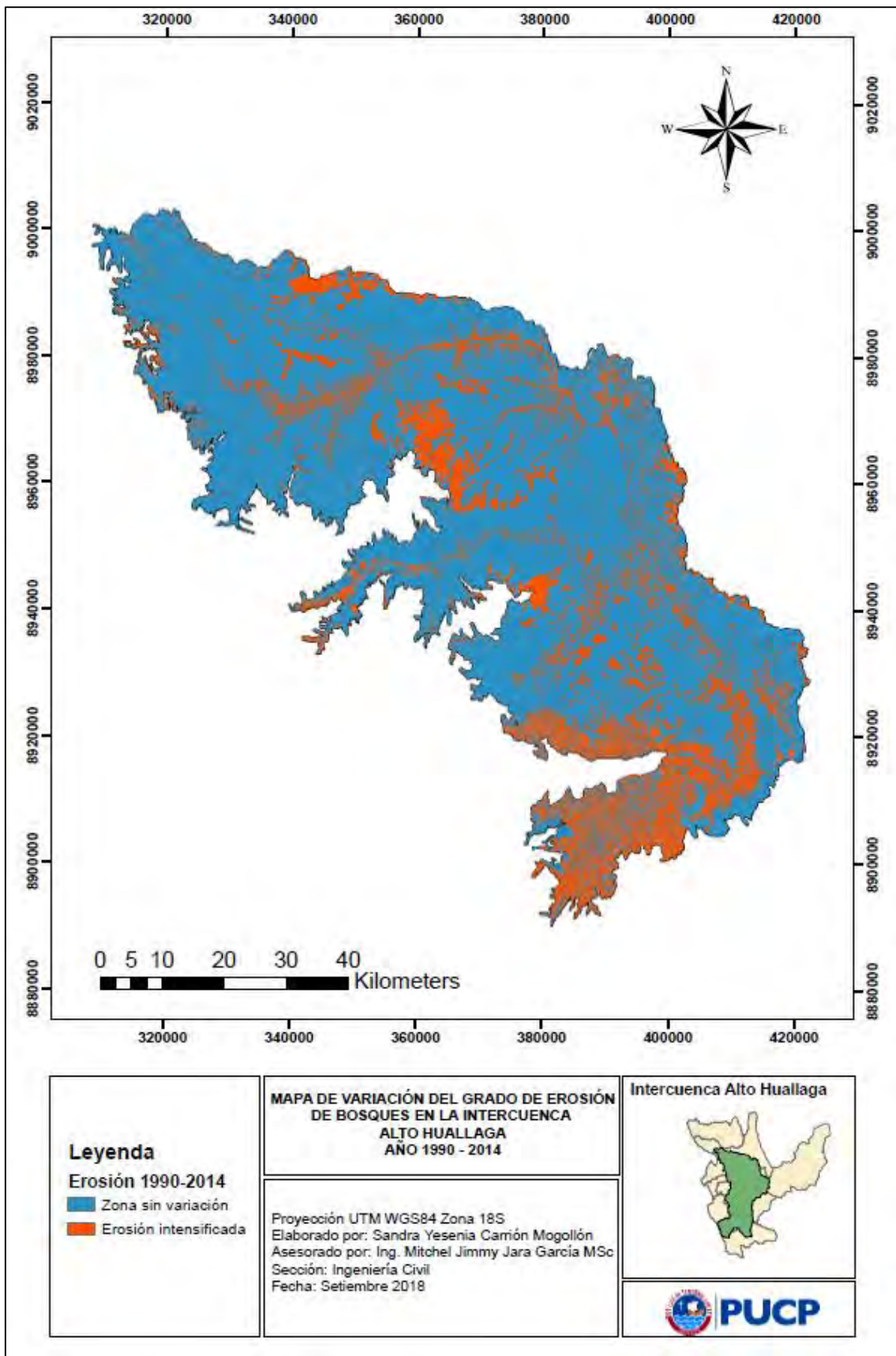


Figura 55. Mapa de variación del grado de erosión de bosques entre los años 1990 y 2014. Fuente propia

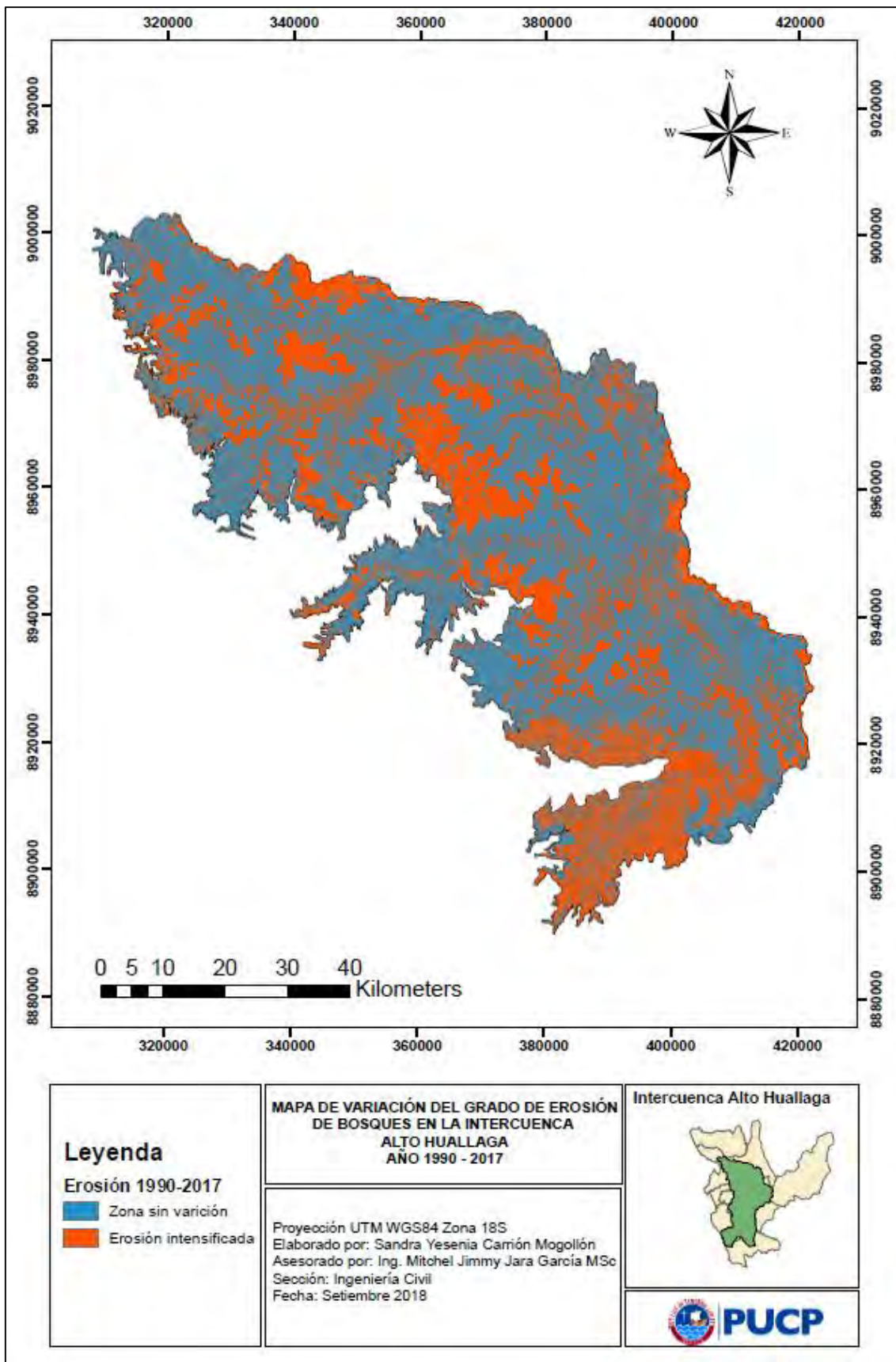


Figura 56. Mapa de variación del grado de erosión de bosques entre los años 1990 y 2017. Fuente propia

Además, la Tabla 23 muestra el valor de caudales generados a partir del modelo GR2M en los 4 años de análisis, como punto de aforo el Río Huallaga en la ciudad de Tingo María, los cuales poseen gran similitud y poca variación uno con respecto a otros.

Tabla 23. Caudales (m³/s) generados por el modelo GR2M para los años de análisis. Fuente propia.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media
1990	931.4	481.3	418.0	369.7	282.1	243.3	235.0	114.8	115.3	571.3	557.8	686.7	417.2
2005	385.4	601.6	893.5	253.6	97.5	69.9	44.5	39.8	130.2	382.3	283.0	820.9	333.5
2014	699.1	847.2	762.5	507.4	341.2	177.0	71.4	45.2	311.5	624.5	520.8	825.2	477.8
2017	785.6	841.6	874.7	335.6	345.0	128.6	65.2	79.2	251.2	463.9	839.9	891.1	491.8

Para realizar la comparación entre ambas variables, se construyó la gráfica de la Figura 57, en donde se tabuló, para cada año analizado, el valor de caudal (m³/s) y la erosión total (ton/año). La gráfica representa la relación entre ambas variables a lo largo del tiempo. El valor de erosión total aumenta desde el año 1990 hasta el 2017; sin embargo, los valores de caudal no presentan un incremento similar debido a que, el valor obtenido en el año 2005, es menor.

A partir del registro total obtenido de caudales, se calculó el caudal promedio igual a 430.2 m³/s, mucho mayor al estimado en el año 2005. Asimismo, el valor de la precipitación mensual en la cuenca para el año respectivo es igual a 113.8 mm, menor al promedio de todo el registro, igual a 135.6 mm. De la misma manera, se identificó que el valor de la evapotranspiración, igual a 73.41 mm, es ligeramente superior al valor promedio de la cuenca, con 72.7 mm. Por lo tanto, se puede concluir que el valor bajo del caudal es debido a que el año 2005 fue un año poco lluvioso y con altas tasas de evapotranspiración, que contribuyeron con la salida de agua del sistema y poco almacenamiento de agua y producción de escurrimiento.

Según la gráfica, existe una relación directa entre el caudal y la erosión anual, ya que para los años 1990, 2014 y 2017, ambos parámetros incrementan; por lo tanto, existe una dependencia en el incremento de la erosión respecto a la producción de escurrimiento dentro de la cuenca.

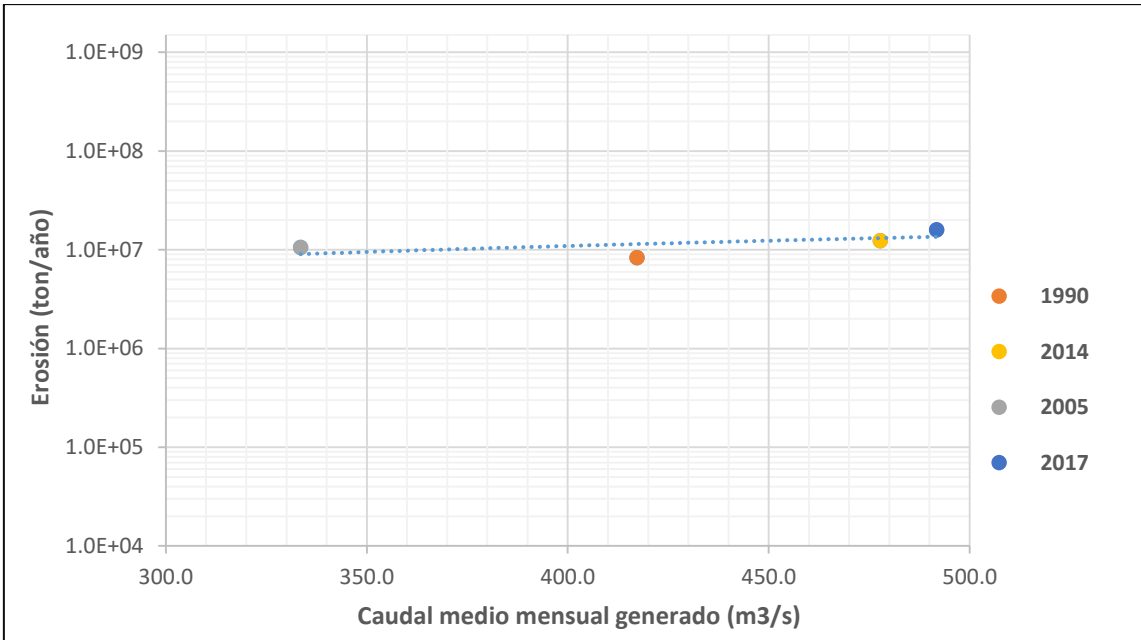
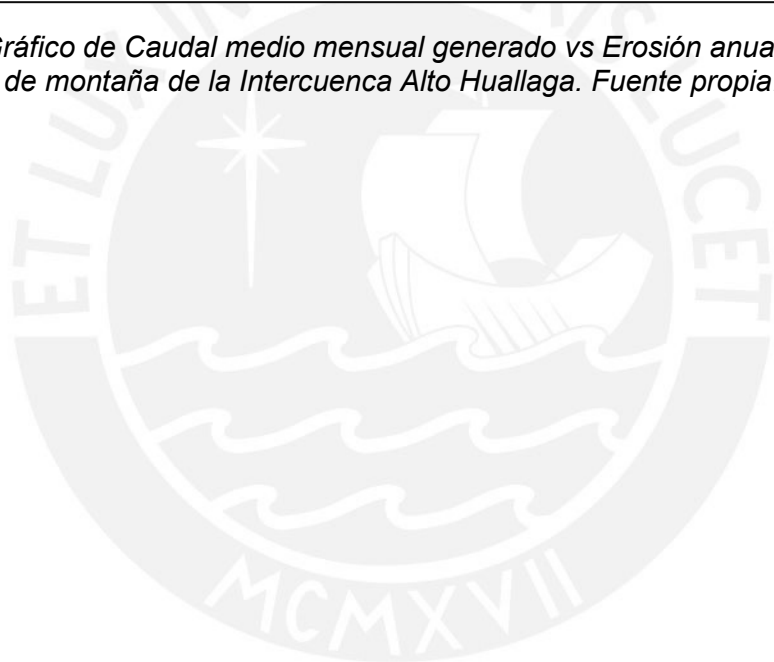


Figura 57. Gráfico de Caudal medio mensual generado vs Erosión anual en Bosques de montaña de la Intercuenca Alto Huallaga. Fuente propia.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a las alarmantes tasas de deforestación presentes en la Intercuenca Alto Huallaga, se cuantificó la tasa de erosión anual y el caudal expresado en escorrentía superficial en un tramo de la cuenca, hasta la ciudad de Tingo María.

Los factores obtenidos para el cálculo de tasa de erosión demostraron la influencia de las características climáticas, edafológicas, topográficas y de cobertura vegetal sobre los resultados. El factor R, que representa la erodabilidad de lluvia, alcanzó los valores mayores en la zona selva de la cuenca, en donde las precipitaciones exceden los 3000 mm. Asimismo, el factor de erodabilidad de suelos K, mostró valores homogéneos en toda la superficie y se identificó sus valores, los más altos en suelos franco-arenosos; los menores en suelos arcillosos. Para este caso es necesario realizar los correspondientes estudios de campo para poder definir la veracidad de resultados. Por otro lado, el factor topográfico LS de la cuenca presenta valores altos en zonas con taludes empinados y cobertura vegetal escasa o de porte bajo, y en pendientes con largas longitudes que contribuyen con el transporte de partículas desprendidas en las partes altas de la cuenca.

El factor de cobertura vegetal C demostró el estado de la vegetación para los 3 escenarios presentados, en donde se observa, que en el año 1990 la cuenca contaba con gran porcentaje de bosques, pero existe un continuo descenso hasta llegar al año 2014. La disminución de zonas boscosas identificadas en las 3 imágenes satelitales se corroboró a partir de los datos publicados por la Plataforma Geobosques del Ministerio del Ambiente en donde los años 2005 y 2014 son aquellos con mayor pérdida de bosques alcanzando valores de 26 406 ha y 27 596 ha respectivamente.

Los valores de tasa de erosión, al ser clasificados por grados de erosividad, mostraron efectos acumulativos sobre el suelo. Desde el año 1990 al 2005, los valores de tasa de erosión menores a 10 ton/ha/año disminuyeron y aquellos entre 10 y 200 ton/ha/año aumentaron; por ende, demuestra la intensificación del grado de erosión. De igual manera, entre los años 2005 y 2014 el porcentaje de valores de erosión entre 0 y 50 ton/ha/año disminuyeron ya que el suelo adquirió condiciones más críticas de erodabilidad al incrementar sus valores a grados alto y muy alto.

Los resultados coinciden con los obtenidos por Rosas (2000) que estimó las tasas de erosión anual a nivel regional de todo el Perú, hallando valores menores a 10 ton/ha/año en territorio amazónico y valores mayores a 50 ton/ha/año en la región andina corroborando los valores obtenidos para la Intercuenca Alto Huallaga. Del mismo modo,

Rosas (2000) descifró que, debido al crecimiento económico a partir de actividades extractivas, las tasas de erosión mostraron un continuo aumento desde el año 1990.

El análisis realizado en la zona de bosques de la cuenca muestra que en el año 1990 el 84.08% del territorio presentó valores de erosión menores o igual a 10 ton/ha/año y disminuyó hasta el año 2014 alcanzando solo el 80.06% de la superficie total. Las tasas de erosión en la Amazonía son menores debido a la densa vegetación que posee, en comparación con las altas pendientes y fuertes eventos torrenciales que presenta la región andina, lo cual intensifica la erosión. A pesar de ello, la erosión total del suelo en bosques para los años 1990, 2005 y 2014 han alcanzado valores elevados de 8, 309,207.98 ton/ha/año, 10, 568,646.03 ton/ha/año y 12, 320,594.52 ton/ha/año respectivamente.

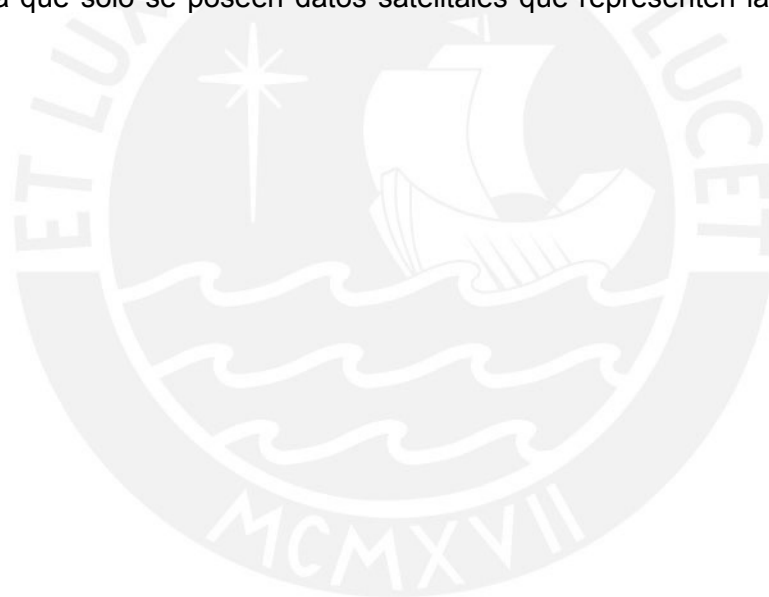
Como parte de la presente investigación, se calculó la escorrentía producida por la cuenca a partir del modelo GR2M. Los resultados mostraron que el pronóstico hidrológico del modelo posee un buen desempeño, pues la eficiencia calculada en los procesos de calibración y validación a partir del criterio de Nash Sutcliffe fueron 82.57 y 86.1 respectivamente, siendo el valor de 100 un indicador de máxima similitud entre valores calculados y observados. Igualmente, el modelo presenta una alta correlación R^2 en los valores alcanzando 0.92 para el proceso de calibración y 0.98 para la validación. También, los trabajos realizados por Casas y Mejía (2017), Vera (2011) y Herrera (2015) manifiestan que la aplicación del modelo GR2M para cuencas con alto porcentaje de bosques ofrece una buena aproximación en la estimación de caudales y gran semejanza con el comportamiento real de la cuenca.

Con los valores de escorrentía superficial y tasas de erosión de la cuenca, se llega a la conclusión que existe una tendencia en el incremento de ambas variables a lo largo de los años, es decir, son parámetros dependientes. A pesar que los valores de caudal medio no presentan cambios significativos en los 4 escenarios, y el caudal calculado para el año 2005 es menor al promedio mensual del registro general, los valores totales de erosión aumentaron al disminuir el porcentaje de bosques sobre la cuenca. Se recomienda, para futuros estudios, analizar la mayor cantidad de años posibles para obtener una gráfica representativa de la cuenca, en donde se logre identificar aquellos años con el mismo comportamiento, en donde los valores de caudal aumentan de manera simultánea con la erosión total, y poder discretizar de los valores atípicos, como en este caso, el año 2005.

Según Gonzales y Llanos (2015) son necesarios estudios con mayor detalle en donde se incluya el efecto de variables climáticas para conocer el efecto verdadero de la

deforestación sobre la hidrología. Sin embargo, el presente trabajo de investigación brindó resultados representativos de la zona de estudio con metodologías que no poseen alta complejidad y pueden ser utilizados para futuros análisis en la cuenca del Huallaga o similares.

Por tal motivo, Vargas (2011) recomienda el uso de modelos con mayor complejidad que consideren variables hidrológicas como humedad del suelo antes y después de la remoción de bosques. Asimismo, Brujinzeel (2010) expone que es necesario poseer información de campo cuantitativa como valores de capacidad de infiltración en todas las capas del suelo, retención y capacidad de almacenamiento de agua, porcentaje de interceptación de lluvia y el uso otorgado al recurso hídrico en la cuenca, para poder conocer el efecto de la deforestación asociado al flujo de ríos. Sin embargo, como menciona Tobón (2009) existe ausencia y escasez de información hidrológica y meteorológica en bosques que superan los 1000 msnm, originando incertidumbre en la estimación ya que solo se poseen datos satelitales que representen la cuenca en su totalidad.



BIBLIOGRAFÍA

Agencia AFP. (2018). Más de 120 000 hectáreas de bosques desaparecen en la Amazonía peruana cada año. Gestión. Recuperado de <https://gestion.pe/economia/120-000-hectareas-bosques-desaparecen-amazonia-peruana-ano-233166>

Autoridad Nacional del Agua. (2015). Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca Huallaga. Recuperado de <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/19>

Autoridad Nacional del Agua. (2013). Atlas de Recursos Hídricos del Perú. Recuperado de <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/217>

Beguiria, S. (2005). Erosión y fuentes de sedimento en la cuenca del embalse de Yesa (Pirineo Occidental): Ensayo de una metodología basada en teledetección y análisis SIG. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza.

Brujinzeel, L. (2004). *Funciones hidrológicas de los bosques tropicales: ¿no viendo el suelo para los árboles?* Agriculture, Ecosystems and Environment (104), 185-228.

Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado de [/www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)

Capecchi, V., Crisci, A., Lorenzo, G., Maselli, F. y Vignaroli, P. (2008). Analysis of NDVI trends and their climatic origin in the Sahel 1986 – 2000. *Geocarto International* (23), 297-310.

Carvajal, L. y Roldán, E. (2007). Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J aplicación: Cuenca del Río Aburrá. *Dyna*, 154, 73-87

Chávez, R. (1994). *Hidrología para Ingenieros*. Lima, Perú: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Chereque, W. (1989). Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil. Lima, Peru: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Comisión con la asistencia técnica del Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. (2015). Plan de Desarrollo Territorial para la Zona del Huallaga al 2021. Recuperado de https://www.ceplan.gob.pe/documentos_/plan-de-desarrollo-territorial-para-la-zona-del-huallaga-al-2021-2/

Doornbos, B. (2015). El valor de los bosques andinos en asegurar agua y suelo en un contexto de creciente riesgo climático: ¿(re)conocemos lo imperdible?. *Artículo de*

opinión (3). Recuperado de http://www.bosquesandinos.org/wp-content/uploads/2015/12/061115_articulo_n3.pdf2

Dumas, A. (2012). *Riesgo de Erosión Hídrica en la cuenca hidrográfica del Río Mundo. (Tesis de maestría)*. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

FAO. (s/f). Permeabilidad del suelo. Recuperado de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm

FAO. (s/f). Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo v1.2. Lugar de publicación: *Portal de suelos de la FAO*. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/base-de-datos-armonizada-de-los-suelos-del-mundo-v12/es/>

FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS y JRC. (2009). *Harmonized World Soil Database (version 1.1)*, Laxenburg, Austria.

FAO. (2009). Guía para la descripción de Suelos. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>

Fatorelli, S. y Fernández, P. (2011.). *Diseño Hidrológico*. (2a ed.). Recuperado de mail.google.com/mail/u/0/?tab=wm#inbox/15fa1a6aacdc6cc2?projector=1

Fernandez, L. (2016). "La principal causa de la deforestación es la agricultura ilegal". El Comercio. Recuperado de <https://elcomercio.pe/peru/principal-causa-deforestacion-agricultura-ilegal-266589>

Foster, P. (2001). The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth-Science Reviews* (55), 73–106.

Garcia-Chevesich, P. (2015). *Control de la erosión y recuperación de suelos degradados*. Estados Unidos.

Gobierno Regional de Huánuco. (2016). Estudio hidrológico e hidráulico para la construcción del puente Tingo María – Castillo Grande.

González, C. y Llanos, R. (2015). *Evaluación de los efectos de la deforestación en la hidrología y pérdida lateral de carbono orgánico del suelo de la cuenca del Alto Mayo*. Recuperado de http://www.conservation.org/global/peru/biocuencas/Documents/Carlos_Gonzales_Inca.pdf

- Gómez-Tagle, A., Ávila, J., Brujinzeel, L. y Gómez-Tagle, A. (2015). Partición de la precipitación en un bosque tropical montano de pino-encino en el centro de México. *Bosque*, volumen 36 (3), 505-518.
- Gomes, L., Simoes, S., Forti, M., Ometto, J. y Dalla Nora, E. (2017). Using Geotechnology to Estimate Annual Soil Loss Rate in the Brazilian Cerrado. *Journal of Geographic Information System* (9), 420-439.
- Healton, L., Fullen, M. y Bhattacharyya, R. (2016). Critical Analysis of the van Bemmelen Conversion Factor used to Convert Soil Organic Matter Data to Soil Organic Carbon Data: Comparative Analyses in a UK Loamy Sand Soil. *Espaço Aberto, PPGG-UFRJ* (6), 35-44.
- Heras, R. (1983). *Recursos Hidráulicos: síntesis, metodologías y normas*. Madrid, España: Cooperativa de Publicaciones del Colegio IC, D.L. 1983.
- Herrera, J. (2015). *Generación y calibración de caudales medios mensuales mediante el modelo GR2M en la cuenca del Río Coata* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Huerta, P. y Loli, O. (2014). Erosión Hídrica en la cuenca alta del Río Moche. *Ecología Aplicada*, vol 13 (1). Recopilado de http://www.lamolina.edu.pe/ecolapl/Articulo_2_no1_%20vol_13.pdf
- Lavado, W., Labat, D., Guyot, J., Ardoin-Bardin, S. y Orodoñez, J. (2011). Modelos de balance hídrico mensual en la cuenca hidrográfica del Amazonas en Perú: Cuenca del río Ucayali. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA* (3), 82-94.
- Makhlouf, Z. y Michel, C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hidrology* (162), 299-318.
- Mancilla, G. (2008). *Uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) en el campo forestal* [Cuadro 2: Códigos USLE de permeabilidad del suelo]. Recuperado de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120400/Apuntes_docentes_USLE.pdf?sequence=1
- Marañón, T., Aponte, C., Perez-Ramos, I., Ibañezs, B., Domínguez, M., Ventura, L. y Gómez, L. (2012). Interacciones árbol-suelo y funcionamiento del bosque mediterráneo: síntesis del proyecto Interbos. *Sociedad Española de Ciencias Forestales* (35), 81-89.
- Martínez, A. y Navarro, J. (1996). *Hidrología Forestal: El Clico Hidrológico*. Valladolid, España: Secretariado de publicaciones.

Martínez, J. (2005). PERCEPCIÓN REMOTA: “Fundamentos de Teledetección Espacial”. Recuperado de <http://siga.conagua.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>

Mena, U. (2007). Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en la Ingeniería Civil: Boletín IIE. Mexico. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

Minagri: Perú pierde 120 782 hectáreas de bosques al año por la deforestación. (14 de Noviembre del 2016). Gestión. Recuperado de <http://gestion.pe/economia/minagri-peru-pierde-120782-hectareas-bosques-al-ano-deforestacion-2174618>

Ministerio del Ambiente, Grupo de Aves del Perú y Universidad Agraria de la Selva-Tingo Maria (s/f). *Ecología y conservación de Aves en el Bosque Montano de Huánuco*. Recuperado de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/AEF99816EEF18FD205257D8E005B7A18/\\$FILE/aves-como-indicadores.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/AEF99816EEF18FD205257D8E005B7A18/$FILE/aves-como-indicadores.pdf)

Ministerio del Ambiente (2015). Módulo bosque y pérdida de bosques. Lugar de publicación: Geobosques. Recuperado de <http://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php>

Morgan, R. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. Australia, Blackwell Publishing.

Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. y V. Andréassian. (2006). Stepwise development of a two parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* (318), 200-214.

Nasui, D. y Zisu, I. (2015). *Using Universal Soil Loss Equation for Soil Erosion Assessment Agricultural Land from Lugo Hills*. *Geographica Timisiensis* (24), 13-23.

Olaya, V. (2011). Sistemas de Información Geográfica. Recuperado de https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf

Oliver, M.A. (1990). Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems* (4), 313-332.

Peña, M. (2007). Correcciones de una Imagen Satelital ASTER para estimar parámetros vegetacionales en la cuenca del río Mirta, Aisén. *Bosque* (28), 162-172.

Perrin, C., Michel, C. y Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hidrology*, 279, 275-289

Presidencia del Consejo de Ministros. (2015). PCM: El Huallaga se convirtió en el primer valle productivo agrícola del Perú. Recuperado de <http://www.pcm.gob.pe/2015/04/pcm-el-huallaga-se-convirtio-en-el-primer-valle-productivo-agricola-del-peru/>

Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático del Ministerio del Ambiente. (2018). Boletín Alertas Tempranas de Deforestación 03. Lima. Ministerio del Ambiente.

Rosas, M. (2016). *Cuantificación de la erosión hídrica en el Perú y los costos ambientales asociados*. (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.

Sanchez, M., Fernandez, A. y Illera, P. (1999). Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión Forestal. *VIII Congreso Nacional de Teledetección*, 96-99

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. (s/f). Huánuco y su comunidad campesina de San Marcos juntos para proteger y conservar los bosques de neblina de la tala y quema indiscriminada. Recuperado de <http://old.sernanp.gob.pe/sernanp/noticia.jsp?ID=629>

Salina, I. (2005). *Estudio taxonómico del orden Scrophulariales (Magnoliopsida) en los Bosques Montanos Húmedos de Carpish (Dpto. Huánuco, Perú)*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.

Suarez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucamaranga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología del Perú. (2014). Segunda campaña de aforos a la cuenca del río Huallaga. Recuperado de <http://www.orehybam.org/index.php/eng/>

Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología del Perú. (2017). Atlas de erosión de suelos por Regiones Hidrológicas del Perú. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-7.pdf>

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, German development Institute y Global Green Growth Institute (2015). Interpretación de la dinámica de la deforestación en el Perú y lecciones aprendidas para reducirla. Recuperado de <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/Interpretacion-de-la-dinamica-de-la-deforestacion-en-el-Peru-y-lecciones-aprendidas-para-reducirla-1.pdf>

Tayupanta, J. (1993). *La erosión Hídrica: Procesos. Factores y formas*: Boletín informativo N°229. Quito. Unidad Nacional de Investigaciones Agropecuarias.

Tobón, C. (2009). *Los bosques andinos y el agua*. Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERATION. Quito. Recuperado de <http://www.asocam.org/biblioteca/files/original/b6a77b5786ffc08556b4861b514e76d6.pdf>

UNESCO (2010). *Control de erosión – sedimentación en cauces y cuencas*. Daniel Brea, Francisco Balocchi. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002281/228183S.pdf>

Vásquez, A. y Tapia, M. (2011). Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiaridas de la sierra peruana. *Revista Ingeniería UC*, vol 18 N°3, 42-50. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/707/70723269005.pdf>

Ven Te Chow, Maidment, D.R., Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa fé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill INTERAMERICANA S.A.

Vera, H. (septiembre, 2011.). *Aplicación del modelo GR2M*. En 4ta reunión científica ORE-HYBAM, hidrología y geodinámica de las cuencas sudamericanas, Perú: MINAM.

Wagner, K . (2018). Conjunto de herramientas para la gestión forestal sostenible. *FAO, Forestry Department*. Recuperado de <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/mountain-forests/in-more-depth/es/>

ANEXOS

ANEXO 1. Análisis de saltos y tendencias de estaciones meteorológicas.

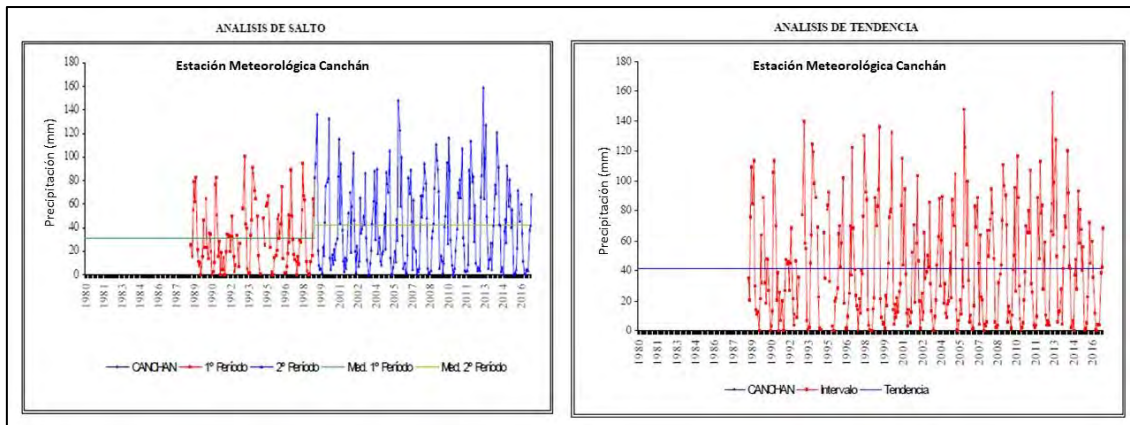


Gráfico 1. Análisis de salto y tendencia de la precipitación media mensual en la estación meteorológica Canchán.

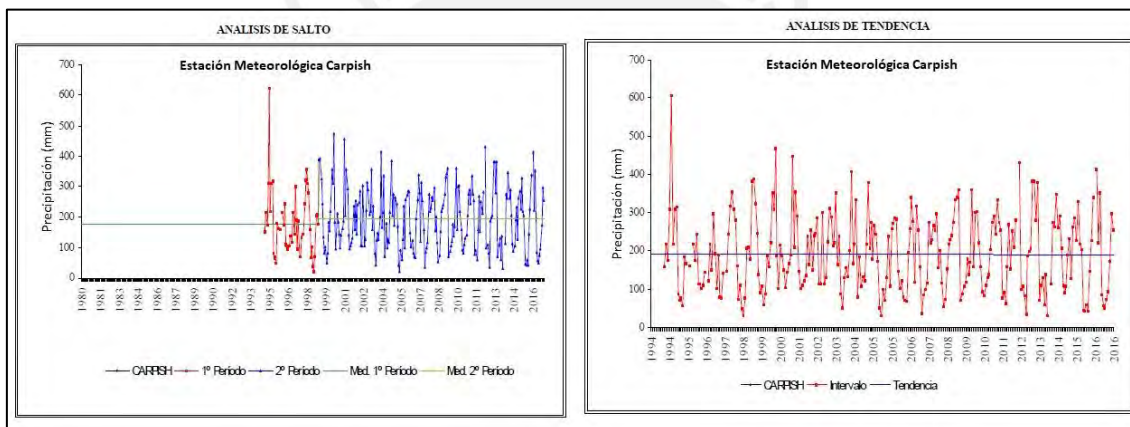


Gráfico 2. Análisis de salto y tendencia de la precipitación media mensual en la estación meteorológica Carpish.

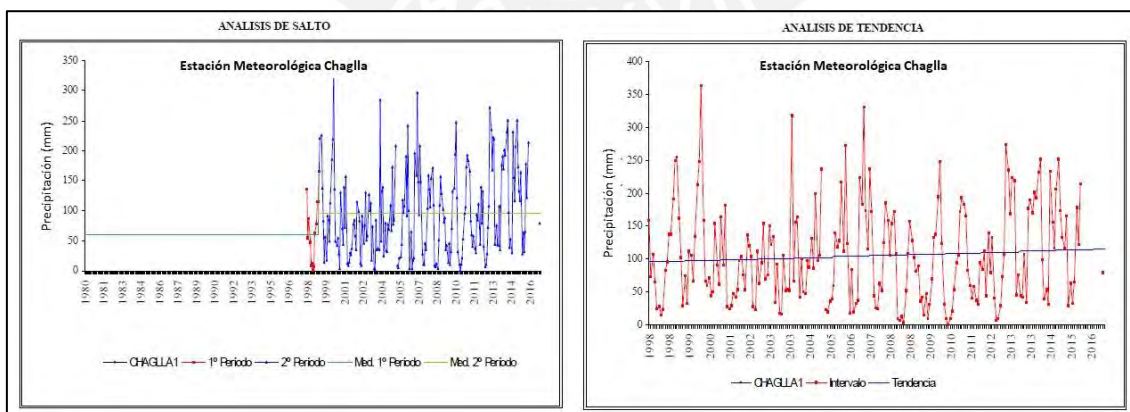
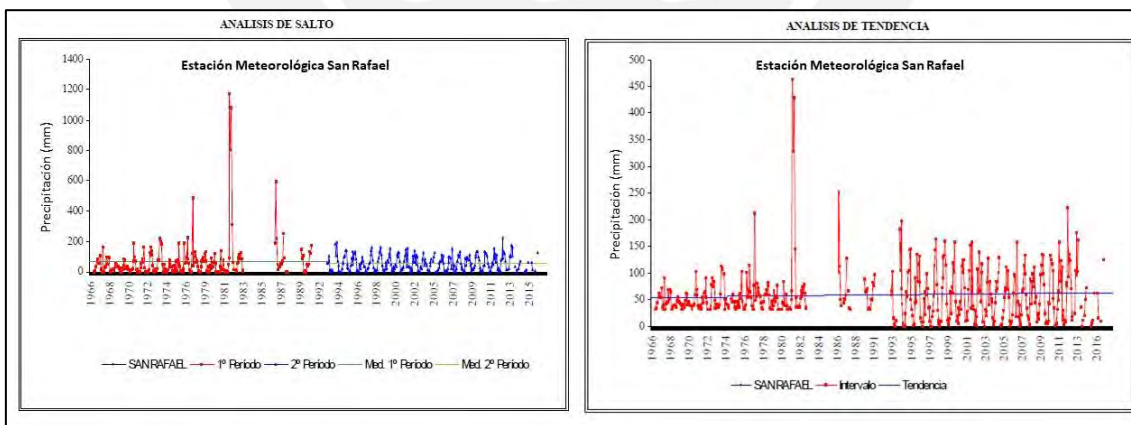
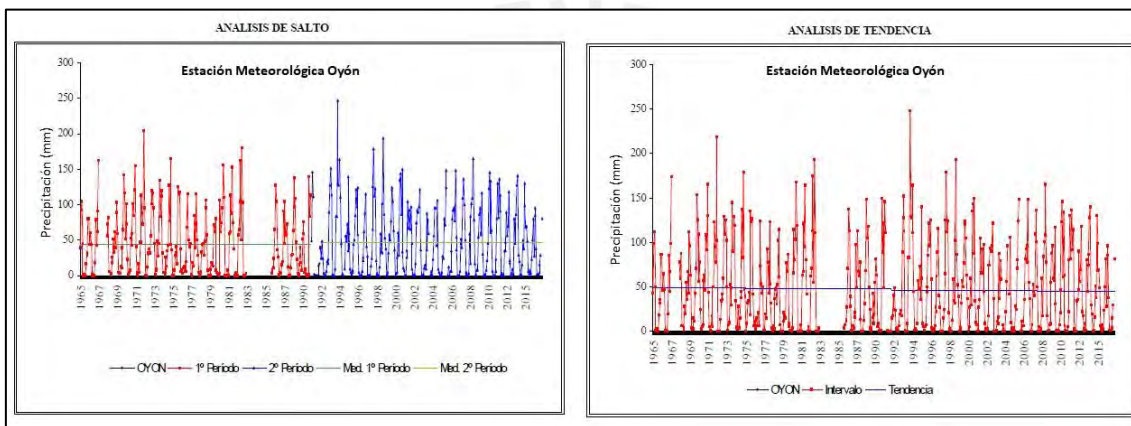
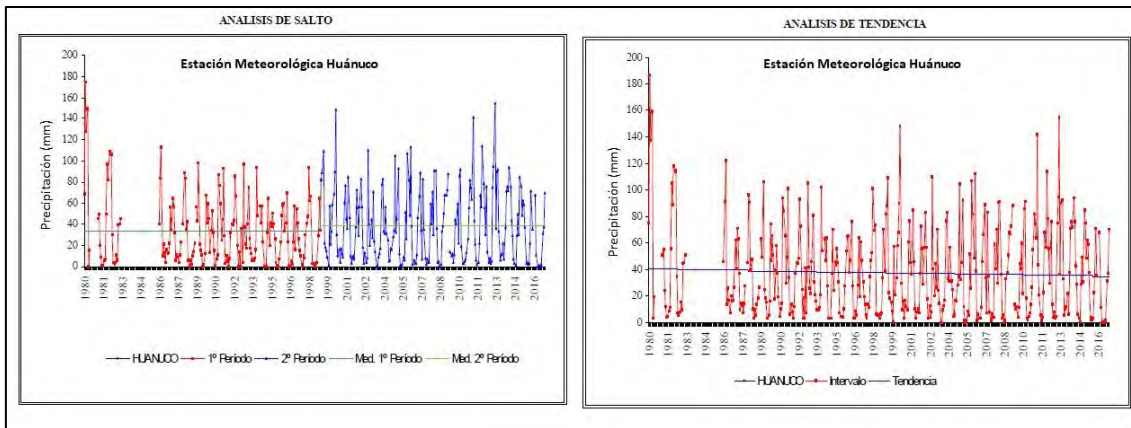


Gráfico 3. Análisis de salto y tendencia de la precipitación media mensual en la estación meteorológica Chaglla.



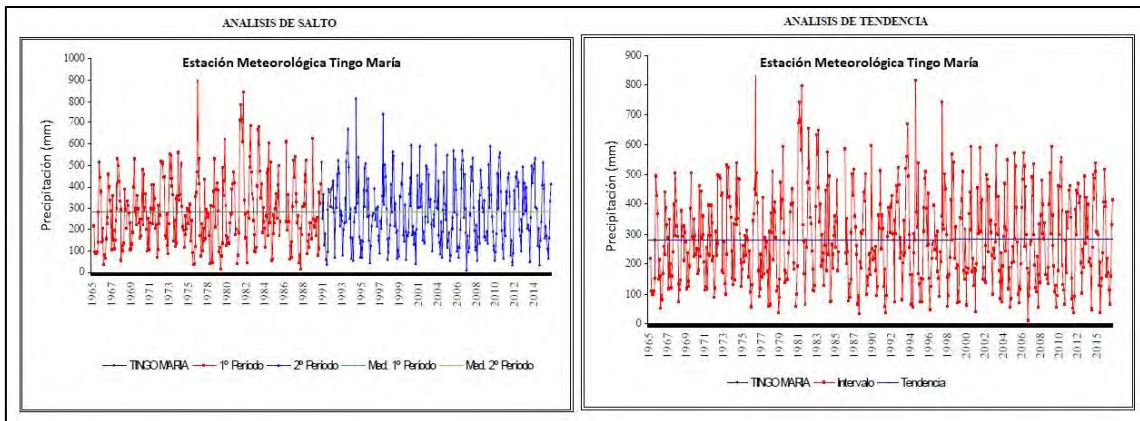


Gráfico 7. Análisis de salto y tendencia de la precipitación media mensual en la estación meteorológica Tingo María.

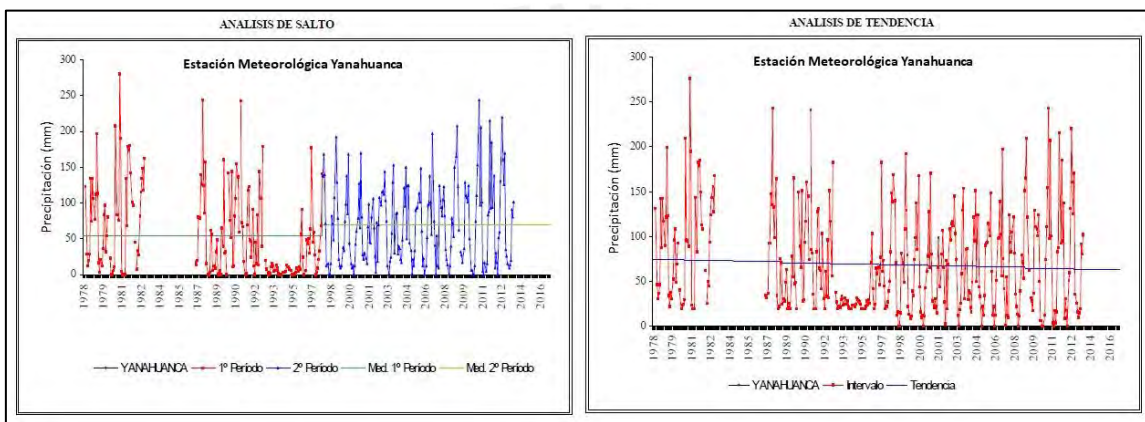


Gráfico 8. Análisis de salto y tendencia de la precipitación media mensual en la estación meteorológica Yanahuana.

ANEXO 2. Serie de Precipitación Mensual (mm) completada y extendida en estaciones meteorológicas.

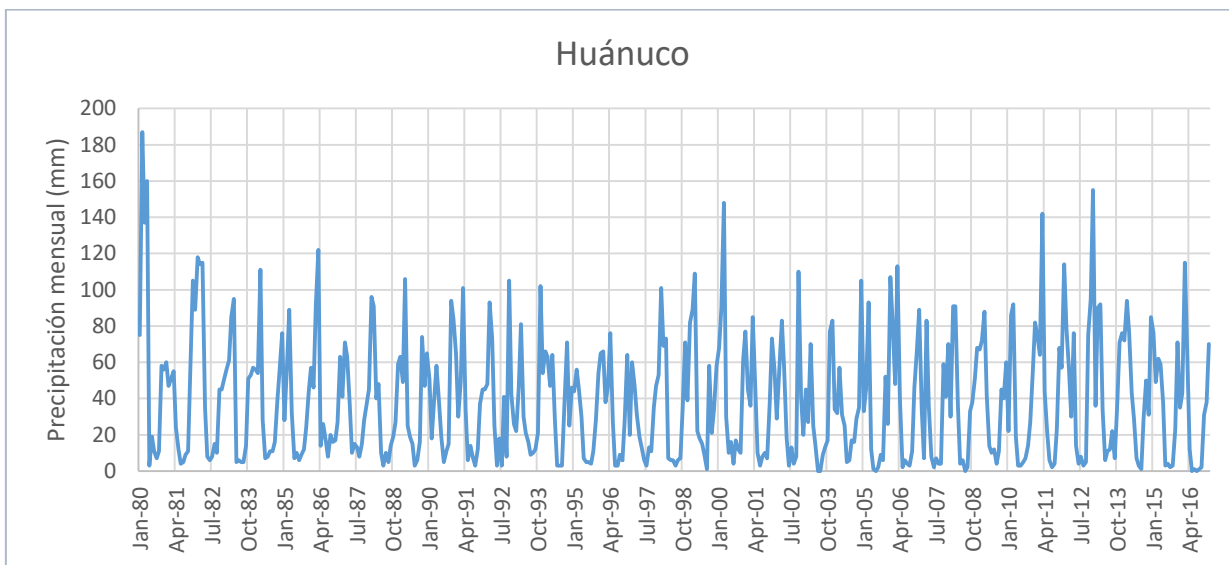


Gráfico 2. Precipitación media mensual (mm) en estación meteorológica Huánuco 1980-2016.

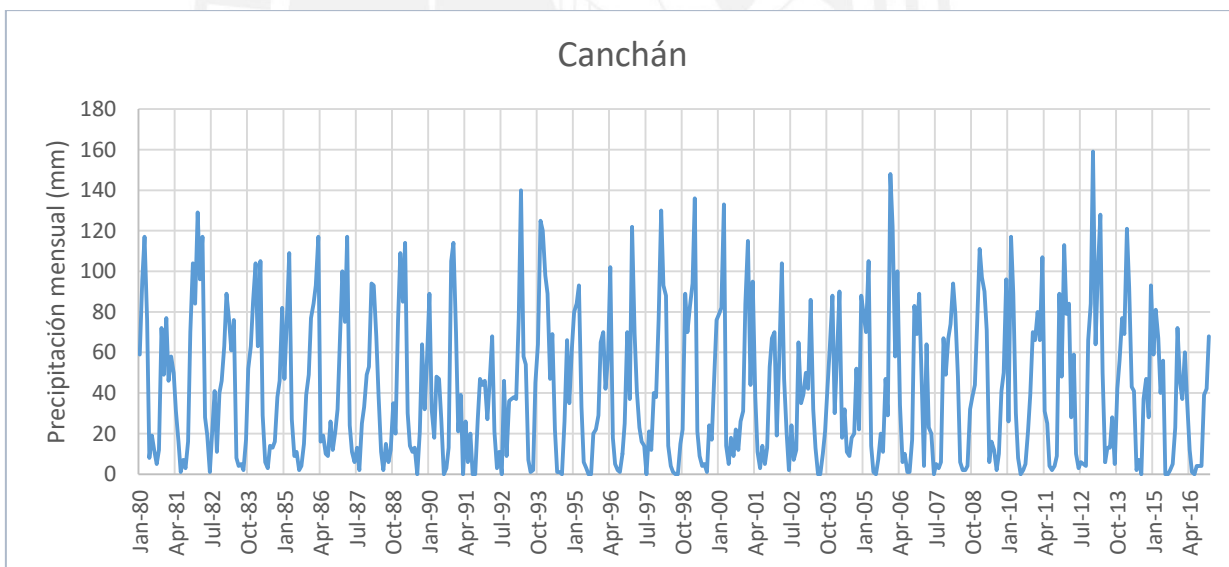


Gráfico 3. Precipitación media mensual (mm) en estación meteorológica Canchán 1980-2016.

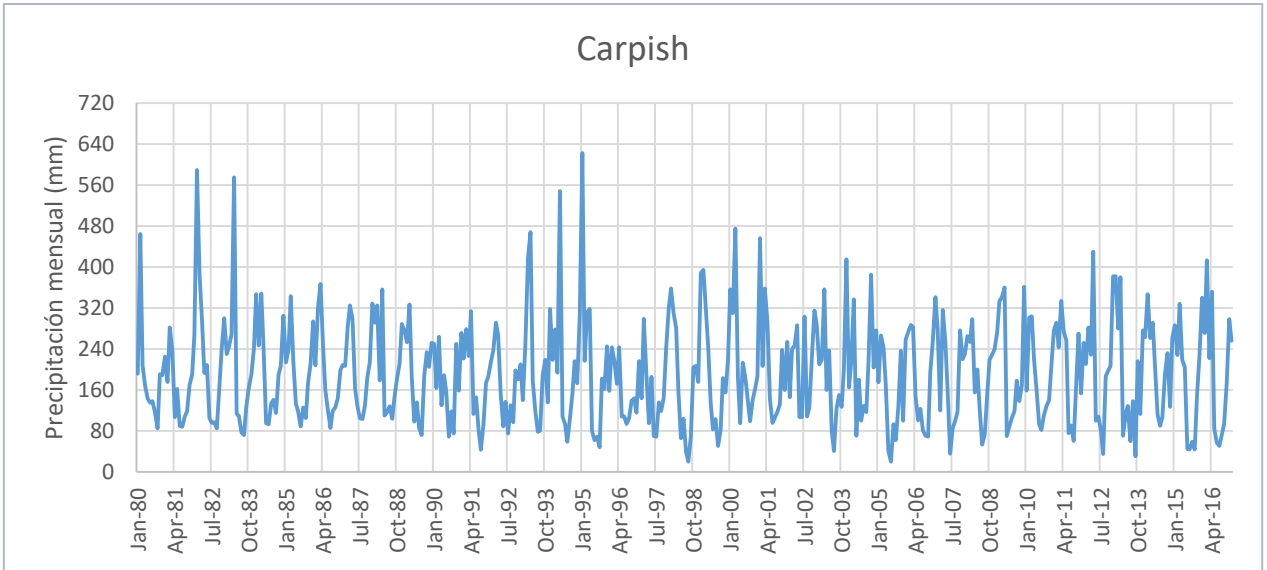


Gráfico 4. Precipitación media mensual (mm) en estación meteorológica Carpish 1980-2016.

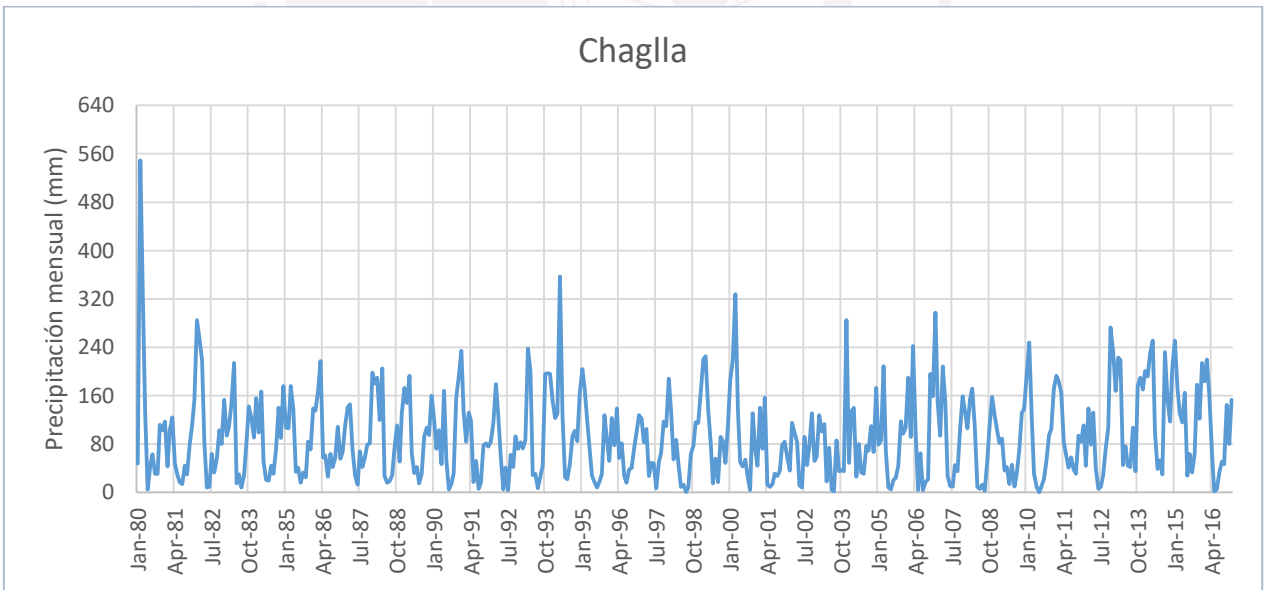


Gráfico 5. Precipitación media mensual (mm) en estación meteorológica Chaglla 1980-2016.

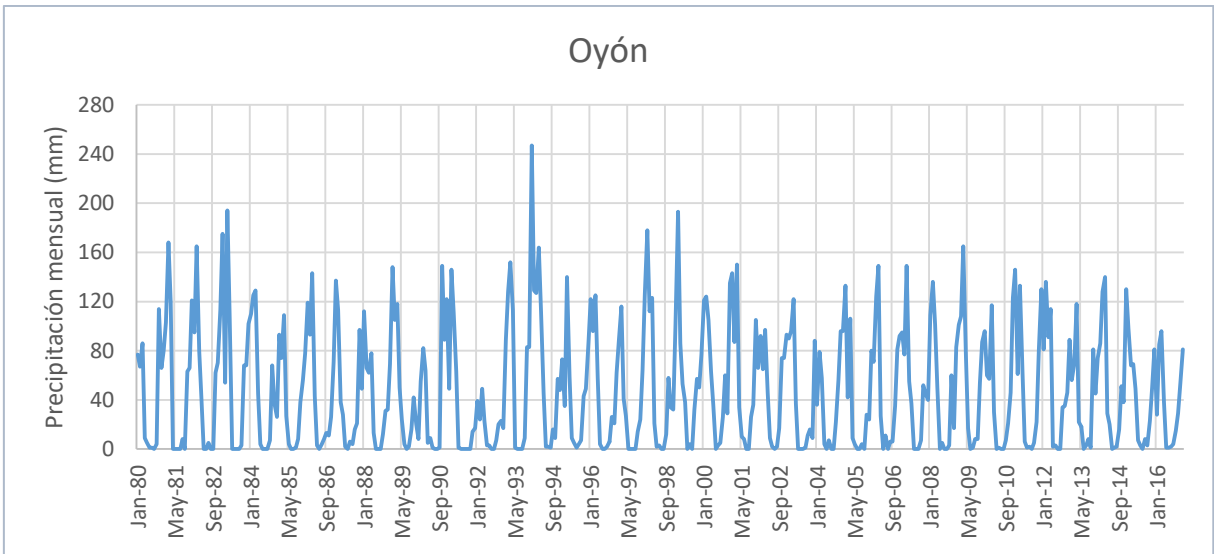


Gráfico 6. Precipitación media mensual (mm) en estación meteorológica Oyón 1980-2016.

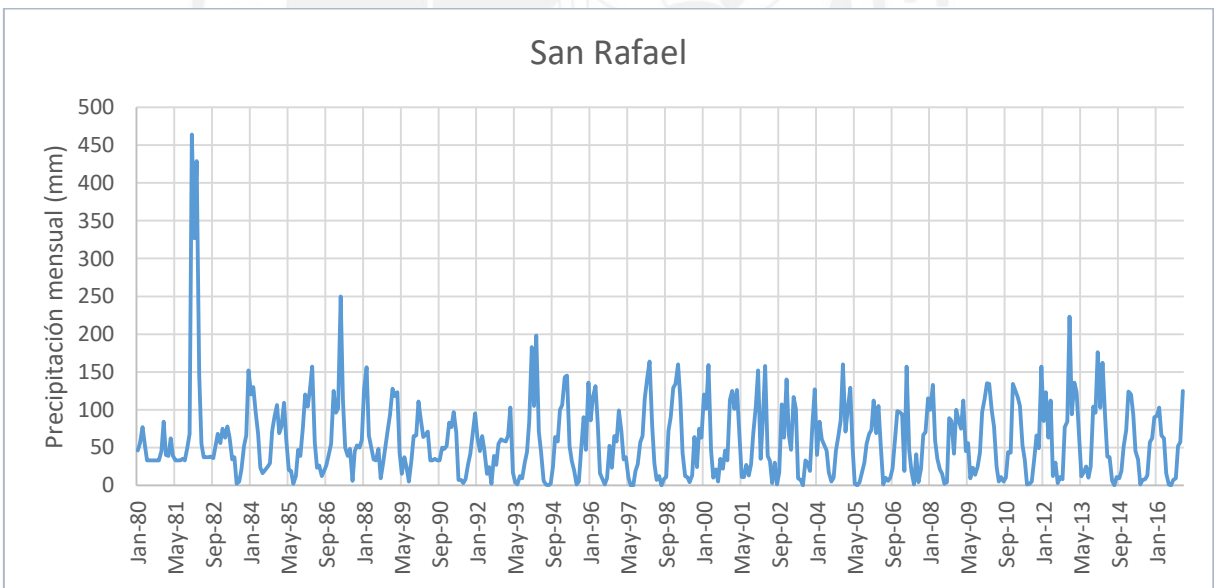


Gráfico 7. Precipitación media mensual (mm) en estación meteorológica San Rafael 1980-2016.

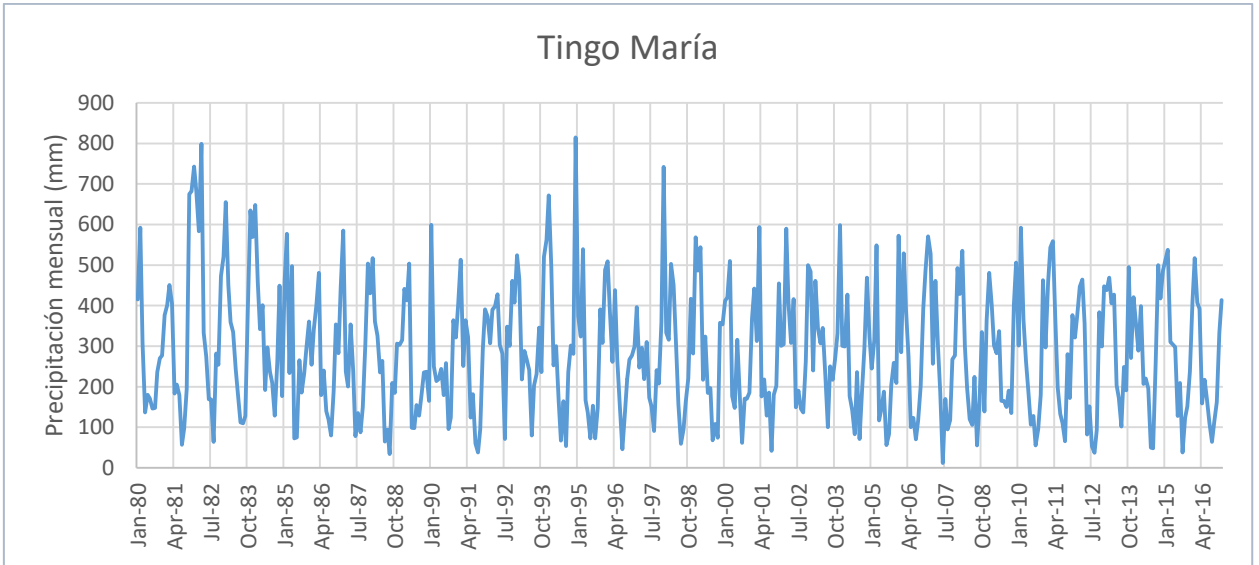


Gráfico 8. Precipitación media mensual (mm) en estación meteorológica Tingo María 1980-2016.

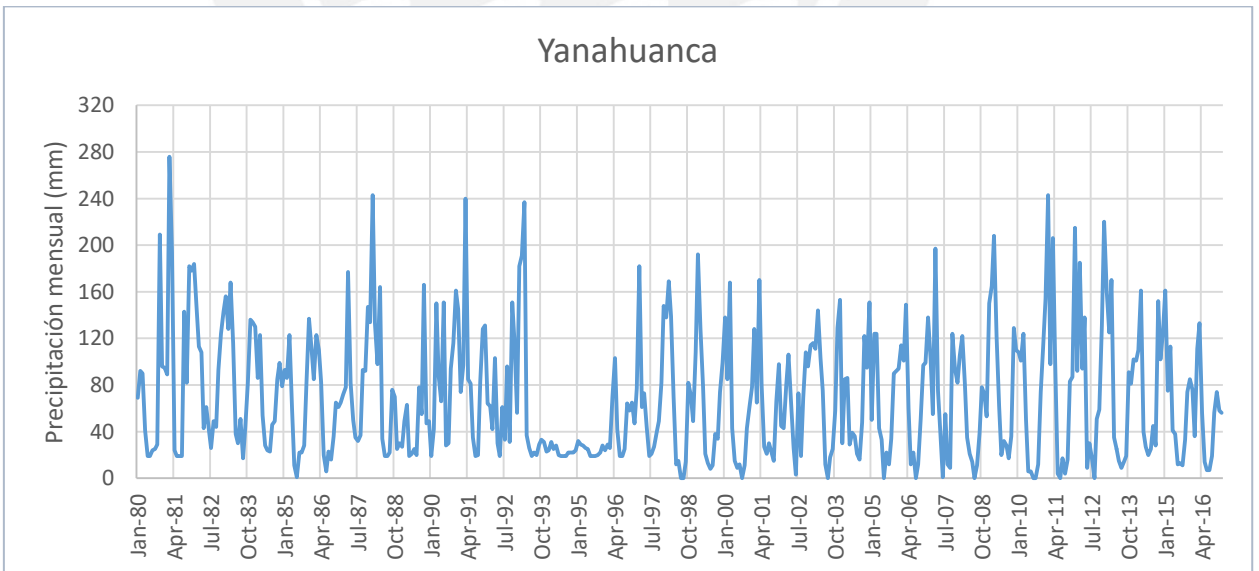


Gráfico 9. Precipitación media mensual (mm) en estación meteorológica Yanahuanca 1980-2016.

ANEXO 3. Serie de caudales mensuales en Tingo María (m³/s).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1980	647.0	1158.6	825.7	550.1	209.9	246.3	194.6	211.9	310.3	496.7	561.7	649.8
1981	616.7	979.7	763.4	359.2	282.0	262.9	119.1	155.4	251.4	848.8	1008.8	1136.5
1982	1013.3	1217.0	1240.7	550.0	363.6	207.2	209.1	130.9	389.6	518.6	784.7	723.8
1983	939.2	868.5	788.4	576.8	320.8	285.6	129.7	128.7	207.2	488.8	833.2	989.6
1984	939.0	1034.4	747.3	300.1	321.8	468.5	339.2	294.0	287.8	389.8	688.3	434.1
1985	704.0	1009.7	527.4	757.7	126.8	107.2	293.5	244.4	367.8	443.7	724.2	505.9
1986	694.2	809.3	1013.0	392.1	376.6	192.1	199.4	245.4	392.6	493.6	439.7	676.7
1987	972.0	670.8	504.6	603.6	350.5	180.9	361.7	150.2	171.8	466.9	826.6	673.9
1988	984.1	811.1	691.7	533.7	392.5	102.9	142.3	51.4	270.4	306.8	441.3	475.3
1989	556.7	763.1	738.4	737.9	200.7	215.8	194.2	175.2	321.6	488.1	550.0	412.1
1990	802.9	516.4	479.3	453.1	378.2	379.3	281.2	141.7	215.2	562.3	659.6	710.5
1991	680.2	610.7	837.4	529.0	190.0	291.7	137.7	70.2	202.2	476.3	579.9	631.2
1992	476.6	746.8	688.6	611.6	352.5	413.5	120.2	453.5	393.2	833.7	590.9	769.0
1993	599.1	513.4	653.7	586.3	438.0	219.1	255.7	263.3	390.0	381.6	839.5	853.3
1994	1038.1	907.3	531.1	549.5	278.0	134.6	188.6	76.7	343.2	530.0	490.0	1125.0
1995	929.5	694.6	934.7	494.7	226.7	132.7	193.3	108.4	275.5	521.0	634.2	703.5
1996	722.4	710.4	535.4	740.2	376.4	233.1	115.7	195.5	324.1	418.2	456.4	504.6
1997	631.7	667.0	532.1	347.6	429.6	240.5	187.7	190.8	342.4	340.8	591.1	1059.0
1998	777.8	852.1	865.5	630.4	348.0	240.7	92.5	114.7	214.1	389.0	667.0	476.8
1999	964.1	1037.4	1034.3	518.2	446.5	282.3	271.4	112.5	222.1	278.9	539.5	616.6
2000	804.5	920.0	1137.6	409.6	241.6	485.5	332.1	199.0	273.2	320.8	383.9	661.5
2001	979.7	673.2	1027.1	501.1	352.0	207.7	277.5	153.8	288.9	443.3	728.2	619.0
2002	453.8	976.3	767.0	620.3	528.4	243.9	467.4	236.9	261.8	484.9	825.3	810.7
2003	521.8	785.5	760.6	550.5	529.2	299.5	130.7	324.1	346.6	386.3	587.0	1039.3
2004	493.6	643.2	805.3	289.9	301.9	182.2	320.6	187.7	393.3	653.5	707.0	698.2
2005	495.0	696.0	927.9	316.1	187.0	207.6	126.1	149.3	288.3	505.3	357.6	889.4
2006	683.7	1011.9	804.6	530.2	188.8	233.3	132.7	174.5	283.9	617.6	834.8	985.5
2007	839.1	460.6	868.7	593.8	349.5	58.1	235.6	161.3	195.1	517.7	534.6	762.4
2008	759.2	1005.6	698.7	439.5	273.3	205.5	254.4	118.8	299.1	519.6	387.6	637.7
2009	843.4	940.4	786.6	720.2	415.2	272.2	275.0	242.8	315.2	352.0	656.6	907.1
2010	521.1	1072.2	796.5	509.9	307.4	182.6	198.3	133.2	208.9	327.9	741.8	646.5
2011	864.2	982.7	1042.6	700.1	415.4	200.6	191.6	116.8	392.6	439.2	579.2	702.6
2012	685.3	927.9	791.0	866.0	235.7	244.9	149.5	77.0	233.6	616.1	636.7	931.8
2013	861.2	985.1	933.5	632.5	320.9	315.0	193.8	353.8	248.1	682.4	503.4	756.0