



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC
PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIOS”**

Línea de investigación:

Sistemas de información y optimización

Tesis para optar el título profesional de ingeniero ambiental

Autor:

Alvarez Ore, Jorge Andres

Asesor:

Ventura Barrera, Carmen Luz

Jurado:

Alva Velásquez, Miguel

Mendoza García, José Tomás

Gonzales Alarcón, Angelino Oscar

Lima - Perú

2023

Dedicatoria

Dedicado a mi padre por el apoyo incondicional en toda mi vida académica incluso en mis grandes y repetitivos fracasos y a mi mamá.

Agradecimiento

A mi asesora Ing. Carmen Ventura por tomarse el tiempo de resolver mis dudas.

A Darwin Ruiz, Miguel García y Ray Piccini por su ayuda en el trabajo de campo, a Joscelyn Vásquez, Grimalda Rojas y Víctor Gallo por la revisión final de la tesis, a mis mejores amigas de la universidad Adalí Coronel, Cynthia Eguizábal, Elizabeth Rodríguez, Jessica Mollehuanca, Sandy Caushi y Sofía De la Cruz por haberme apoyado siempre desde mi reingreso y a mis demás amigos por el apoyo moral.

A mi universidad, sus docentes y alumnos por todos los conocimientos brindados.

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

<i>Dedicatoria</i>	2
<i>Agradecimiento</i>	3
<i>ÍNDICE DE CAPÍTULOS</i>	4
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	8
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	11
<i>RESUMEN</i>	21
<i>ABSTRACT</i>	22
<i>RESUMÉ</i>	23
<i>I: INTRODUCCIÓN</i>	24
1.1 Descripción y formulación del problema.....	24
1.1.1 Descripción del problema	24
1.1.2 Formulación del problema	26
1.2 Antecedentes	27
1.2.1 Antecedentes Nacionales	27
1.2.2 Antecedentes Internacionales.....	31
1.3 Objetivos.....	41
1.3.1 Objetivo general.....	41
1.3.2 Objetivos específicos	41
1.4 Justificación	41
1.4.1 Importancia	43
1.5 Hipótesis	44
1.5.1 Hipótesis general.....	44

<i>II: MARCO TEÓRICO</i>	45
2.1 Bases teóricas.....	45
2.1.1 Ciclo hidrológico.....	45
2.1.2 Balance hídrico	45
2.1.3 Caudal	46
2.1.4 Escorrentía	46
2.1.5 Cuenca hidrográfica	47
2.1.6 Subcuenca	47
2.1.7 Erosión y erosión hídrica	47
2.1.8 Sedimentos.....	49
2.1.9 Modelamiento hidrológico.....	50
2.1.10 Simulación hidrológica	50
2.1.11 Alternativas de solución para la conservación del suelo.....	51
2.1.12 Sistema de Información Geográfica (SIG).....	52
2.1.13 Unidades de respuestas hidrológicas (URH).....	52
2.1.14 Modelo Digital de Elevación (DEM).....	53
2.1.15 Uso del suelo o cobertura vegetal (Land use)	53
2.1.16 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	54
2.1.17 Suelos (Soil type).....	55
2.1.18 Producto grillado PISCO	56
2.1.19 Motor climático CFSR.....	56
2.1.20 Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) e interfaz ArcSWAT.....	57
2.1.21 Ecuación MUSLE (Ecuación universal de pérdida de suelo modificada)	62

2.1.22 Correlaciones: R2, Nash–Sutcliffe y PBIAS	64
2.1.23 Calibración de modelos hidrológicos.....	67
2.1.24 Marco Legal	67
<i>III: MÉTODO</i>	68
3.1 Tipo de investigación.....	68
3.2 Ámbito temporal y espacial	68
3.3 Variables	69
3.3.1 Variables dependientes e independientes del objetivo general	69
3.3.2 Variables dependientes e independientes del primer objetivo específico	69
3.3.3 Variables dependientes e independientes del segundo objetivo específico	70
3.3.4 Variables dependientes e independientes del tercer objetivo específico.....	70
3.4 Población y muestra.....	71
3.4.1 Población.....	71
3.4.2 Muestra	71
3.5 Instrumentos.....	71
3.5.1 Materiales.....	71
3.5.2 Equipos	72
3.5.3 Programas	72
3.6 Procedimientos.....	73
3.7 Análisis de datos	76
3.7.1 Técnicas de recolección de datos cuantitativos.....	76
3.7.2 Recolección de datos: Información de entrada del modelo SWAT	77
3.7.3 Métodos estadísticos para el análisis de información	93

3.8 Consideraciones éticas de la investigación	97
3.9 Descripción del área de estudio	97
3.9.1 Ubicación	97
3.9.2 Diagnóstico Físico.....	101
3.9.3 Diagnóstico biológico	111
3.9.4 Diagnóstico Socioeconómico.....	113
<i>IV: RESULTADOS</i>	<i>115</i>
4.1 Validación de la aplicación del modelo hidrológico SWAT	115
4.1.1 Configuración del modelo SWAT	115
4.1.2 Calibración y validación al modelo SWAT	116
4.1.3 Validación adicional con el modelo hidrológico RS Minerve	134
4.2 Estimación de caudales y sedimentos medios en actual escenario climático y de cobertura vegetal.....	148
4.3 Evaluación de caudales y sedimentos medios en futuro escenario climático y de cobertura vegetal.....	158
4.3.1 Futuro escenario de cobertura vegetal únicamente	159
4.3.2 Futuro escenario climático únicamente.....	169
4.3.3 Futuro escenario climático y de cobertura vegetal.....	180
4.3.4 Comparación entre escenarios	190
<i>V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS</i>	<i>212</i>
<i>VI: CONCLUSIONES</i>	<i>213</i>
<i>VII: RECOMENDACIONES</i>	<i>214</i>
<i>VIII: REFERENCIAS</i>	<i>215</i>

IX: ANEXOS.....	220
9.1 Panel fotográfico.....	220

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Clasificación de la degradación de suelos causados por erosión hídrica.....</i>	48
Tabla 2. <i>Códigos SWAT de cobertura vegetal</i>	53
Tabla 3. <i>Códigos SWAT de los parámetros de los componentes del suelo</i>	55
Tabla 4. <i>VARIABLES del objetivo general</i>	69
Tabla 5. <i>VARIABLES del primer objetivo específico.....</i>	69
Tabla 6. <i>VARIABLES del segundo objetivo específico</i>	70
Tabla 7. <i>VARIABLES del tercer objetivo específico.....</i>	70
Tabla 8. <i>Información de entrada del modelo</i>	77
Tabla 9. <i>Clasificación de pendientes</i>	78
Tabla 10. <i>Suelos</i>	78
Tabla 11. <i>Clasificación de Cobertura vegetal según su NDVI</i>	80
Tabla 12. <i>Pendientes, suelo y uso de suelo / cobertura vegetal presentes en el área de estudio.....</i>	81
Tabla 13. <i>Ubicación de estaciones hidrométricas</i>	82
Tabla 14. <i>Caudales medios mensuales (m³/s) de las estaciones hidrométricas.....</i>	82
Tabla 15. <i>Ubicación de estaciones meteorológicas del producto grillado PISCO para precipitación, temperatura máxima y mínima</i>	84
Tabla 16. <i>Precipitación media mensual (mm) de las estaciones meteorológicas.....</i>	84
Tabla 17. <i>Temperatura máxima media mensual (°C) de las estaciones meteorológicas.....</i>	85
Tabla 18. <i>Temperatura mínima media mensual (°C) de las estaciones meteorológicas</i>	86
Tabla 19. <i>Ubicación de estaciones meteorológicas del motor climático CFSR para velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar</i>	93
Tabla 20. <i>Geología regional</i>	101
Tabla 21. <i>Fisiografía.....</i>	102

Tabla 22. <i>Pendientes</i>	103
Tabla 23. <i>Geomorfología</i>	104
Tabla 24. <i>Suelos</i>	105
Tabla 25. <i>Uso Actual de Tierras (UAT)</i>	106
Tabla 26. <i>Capacidad de uso mayor</i>	106
Tabla 27. <i>Clasificación climática en el área de estudio según Thornthwaite</i>	107
Tabla 28. <i>Cobertura vegetal</i>	111
Tabla 29. <i>Ecosistemas y ecosistemas frágiles</i>	112
Tabla 30. <i>Subcuencas clasificadas por SWAT</i>	117
Tabla 31. <i>Parámetros de la cuenca integral del modelo (área de estudio)</i>	118
Tabla 32. <i>Parámetros de calibración</i>	122
Tabla 33. <i>Resumen estadístico de valores de NSE y PBIAS reportados en literaturas varias</i>	126
Tabla 34. <i>Calificaciones reportadas para Nash-Sutcliffe (NSE) en literaturas varias</i>	127
Tabla 35 <i>Calificaciones reportadas para PBIAS en literaturas varias</i>	127
Tabla 36 <i>Coefficientes de correlación obtenidos en la etapa de calibración en la Est. Río Blanco</i> ..	128
Tabla 37. <i>Parámetros inicialmente configurados en el modelo RS Minerve (cuenca Chillón)</i>	136
Tabla 38. <i>Rango de parámetros de calibración en el modelo RS Minerve</i>	137
Tabla 39. <i>Parámetros de calibración en el modelo RS Minerve</i>	140
Tabla 40. <i>Coefficientes de correlación en la etapa de calibración en la Est. Río Blanco en el modelo RS Minerve</i>	140
Tabla 41. <i>Coefficientes de correlación en la etapa de validación en la Est. Río Blanco obtenidos en el modelo RS Minerve</i>	140
Tabla 42. <i>Comparación de los modelos hidrológicos SWTA y RS Minerve</i>	147
Tabla 43. <i>Resultados medios mensuales de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio) en escenario base.</i>	149
Tabla 44. <i>Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario base.</i>	151
Tabla 45. <i>Escorrentía media anual por subcuenca en escenario base.</i>	152
Tabla 46. <i>Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario base</i>	154

Tabla 47. <i>Sedimentos medio anual por URH (primeros 50) en escenario base.</i>	155
Tabla 48. <i>Resultados medios mensuales de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio) en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.</i>	160
Tabla 49. <i>Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.</i>	162
Tabla 50. <i>Escorrentía media anual por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.</i>	163
Tabla 51. <i>Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.</i>	165
Tabla 52. <i>Sedimentos medio anual por URH (primeros 50) en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.</i>	166
Tabla 53. <i>Resultados medios mensuales de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio) en escenario con cambio climático únicamente.</i>	171
Tabla 54. <i>Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.</i>	173
Tabla 55. <i>Escorrentía media anual por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.</i>	174
Tabla 56. <i>Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.</i>	176
Tabla 57. <i>Sedimentos medio anual por URH (primeros 50) en escenario con cambio climático únicamente.</i>	177
Tabla 58. <i>Resultados medios mensuales de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio) en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	181
Tabla 59. <i>Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	183
Tabla 60. <i>Escorrentía media anual por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	184
Tabla 61. <i>Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	186

Tabla 62. <i>Sedimentos medio anual por URH (primeros 50) en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	187
Tabla 63. <i>Comparación de resultados medios mensuales para los 4 escenarios de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio).</i>	191
Tabla 64. <i>Comparación de caudales medios anuales para los 4 escenarios por subcuenca.</i>	193
Tabla 65. <i>Comparación de escorrentía media anual para los 4 escenarios por subcuenca.</i>	194
Tabla 66. <i>Comparación de Sedimentos media anual para los 4 escenarios por subcuenca.</i>	196
Tabla 67. <i>Comparación de sedimentos media anual para los 4 escenarios por URH</i>	198
Tabla 68. <i>Relación entre la escorrentía y sedimentos en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario base a través del tiempo.</i>	199
Tabla 69. <i>Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario de cambio de cobertura vegetal.</i>	201
Tabla 70. <i>Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario de cambio climático.</i>	202
Tabla 71. <i>Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario de cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	203
Tabla 72. <i>Comparación a través del tiempo de los resultados de caudales para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).</i>	204
Tabla 73. <i>Comparación a través del tiempo de los resultados de escorrentía para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).</i>	206
Tabla 74. <i>Comparación a través del tiempo de los resultados de sedimentos para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).</i>	209

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Representación del ciclo hidrológico</i>	45
Figura 2. <i>Esquema conceptual del balance hídrico en el modelo SWAT</i>	46
Figura 3. <i>Representación hidrológica del modelo SWAT</i>	59

Figura 4. <i>Procesos de corriente modelado por SWAT</i>	60
Figura 5. <i>Etapas y procedimientos de investigación</i>	75
Figura 6. <i>Caudales medios mensuales de las estaciones hidrométricas</i>	83
Figura 7. <i>Precipitación media mensual (mm) de las estaciones meteorológicas</i>	85
Figura 8. <i>Temperatura máxima media mensual (°C) de las estaciones meteorológicas</i>	86
Figura 9. <i>Temperatura mínima media mensual (°C) de las estaciones meteorológicas</i>	87
Figura 10. <i>Comparación entre datos PISCO y convencional de precipitación diaria en la Est. Casapalca</i>	88
Figura 11. <i>Comparación entre datos PISCO y convencional de precipitación diaria en la Est. Río Blanco</i>	88
Figura 12. <i>Comparación entre datos PISCO y convencional de precipitación diaria en la Est. San José de Parac</i>	88
Figura 13. <i>Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura máxima diaria en la Est. Matucana</i>	89
Figura 14. <i>Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura máxima diaria en la Est. Pachachaca</i>	89
Figura 15. <i>Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura máxima diaria en la Est. Pomacocha</i>	90
Figura 16. <i>Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura mínima diaria en la Est. Matucana</i>	90
Figura 17. <i>Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura mínima diaria en la Est. Pachachaca</i>	91
Figura 18. <i>Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura mínima diaria en la Est. Pomacocha</i>	91
Figura 19. <i>Análisis de doble masa en la precipitación PISCO (1981-2016)</i>	94
Figura 20. <i>Análisis de doble masa en la temperatura máxima PISCO (1981-2016)</i>	95
Figura 21. <i>Análisis de doble masa en la temperatura mínima PISCO (1981-2016)</i>	96

Figura 22. <i>Figura de Mapa de Ubicación que muestra el área de estudio de la presente investigación.</i>	97
Figura 23. <i>Figura de Mapa de vista de imagen satelital Sentinel 2B que muestra el área de estudio sobre un fondo de imagen satelital.</i>	98
Figura 24. <i>Perfil longitudinal del área de estudio</i>	98
Figura 25. <i>Perfil transversal del área de estudio</i>	99
Figura 26. <i>Figura de Mapa de vías de acceso que muestra cómo llegar al área de estudio desde la ciudad capital de Lima.</i>	101
Figura 27. <i>Figura de Mapa de geología regional que muestra las categorías de geología regional en el área de estudio.</i>	102
Figura 28. <i>Figura de Mapa de fisiografía que muestra las categorías fisiográficas en el área de estudio.</i>	103
Figura 29. <i>Figura de Mapa de topografía que muestra la topografía del área de estudio a partir del DEM Alos Palsar.</i>	103
Figura 30. <i>Vista tridimensional del área de estudio</i>	103
Figura 31. <i>Figura de Mapa de pendientes que muestra ráster de pendientes en el área de estudio.</i>	104
Figura 32. <i>Figura de Mapa de geomorfología que muestra las categorías geomorfológicas en el área de estudio.</i>	105
Figura 33. <i>Figura de Mapa de suelos que muestra las categorías de suelos en el área de estudio, las cuales se obtuvieron del ráster de suelos Soil Map of the World (versión 3.6) 8800 metros/píxel (FAO/UNESO, 1971).</i>	105
Figura 34. <i>Figura de Mapa de uso actual de tierras que muestra las categorías de Uso Actual de Tierras (UAT) en el área de estudio.</i>	106
Figura 35. <i>Figura de Mapa de capacidad de uso mayor que muestra las categorías de Capacidad de Uso Mayor tierras (CUM) en el área de estudio.</i>	107
Figura 36. <i>Figura de Mapa de máximas intensidades sísmicas que muestra la distribución de máximas intensidades sísmicas en el área de estudio.</i>	107

Figura 37. <i>Figura de Mapa de clasificación climática que muestra la distribución climática en el área de estudio.</i>	107
Figura 38. <i>Figura de Mapa de estaciones meteorológicas e hidrométricas que muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el presente estudio.</i>	108
Figura 39. <i>Figura de Mapa de isotermas máxima media anual que muestra la distribución de temperatura máxima media anual en el área de estudio.</i>	108
Figura 40. <i>Figura de Mapa de isotermas mínima media anual que Muestra la distribución de temperatura mínima media anual en el área de estudio.</i>	108
Figura 41. <i>Figura de Mapa de isoyetas media anual que. muestra la distribución de precipitación media anual en el área de estudio.</i>	108
Figura 42. <i>Curva hipsométrica de la cuenca alta del río Rímac</i>	109
Figura 43. <i>Red hídrica y subcuencas del área de estudio</i>	109
Figura 44. <i>Figura de Mapa de subcuencas e hidrografía que muestra la división de subcuencas y red hidrográfica del área de estudio.</i>	110
Figura 45. <i>Figura de Mapa de zonas de vida que muestra la distribución de zonas de vida en el área de estudio.</i>	111
Figura 46. <i>Figura de Mapa de ecorregiones que muestra las categorías de ecorregiones en el área de estudio.</i>	111
Figura 47. <i>Figura de Mapa de cobertura vegetal que muestra las categorías de cobertura vegetal en el área de estudio.</i>	112
Figura 48. <i>Figura de Mapa de ecosistemas y ecosistemas frágiles que muestra las categorías de ecosistemas y ecosistemas frágiles en el área de estudio.</i>	112
Figura 49. <i>Figura de Mapa de áreas naturales protegidas que muestra la ubicación y distancias de las Áreas Naturales Protegidas más cercanas al área de estudio.</i>	113
Figura 50. <i>Figura de Mapa de pasivos ambientales que muestra la ubicación de los pasivos ambientales presentes en el área de estudio.</i>	114
Figura 51. <i>Selección de ocho parámetros en la calibración SWAT</i>	126

Figura 52. <i>Comparación visual entre caudales simulados (rojo) y observados (azul) luego de 500 simulaciones en la etapa de calibración con el software SWATCUP en la Est. Río Blanco.</i>	129
Figura 53. <i>Calibración y validación diaria con el modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Rímac en la Est. Río Blanco.</i>	130
Figura 54. <i>Calibración y validación mensual con el modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Rímac en la Est. Río Blanco.</i>	131
Figura 55. <i>Correlación lineal entre los caudales simulados (calibrados) y observados (aforos) en la Est. Río Blanco con el modelo SWAT.</i>	132
Figura 56. <i>Correlación lineal entre los caudales simulados (validados) y observados (aforos) en la Est. Río Blanco con el modelo SWAT.</i>	132
Figura 57. <i>Curva frecuencia de duración diaria del caudal simulado vs. observado en la Est. Río Blanco con el modelo SWAT.</i>	133
Figura 58. <i>Comparación visual entre el caudal simulado y observado en la Est. San Mateo con el modelo SWAT.</i>	133
Figura 59. <i>Comparación visual entre el caudal simulado y observado en la Est. Tamboraque con el modelo SWAT.</i>	133
Figura 60. <i>Modelo final en RS Minerve.</i>	138
Figura 61. <i>Comparación visual entre caudales simulados (mostaza) y observados (verde) en la etapa de calibración en la Est. Río Blanco en el modelo RS Minerve.</i>	141
Figura 62. <i>Comparación visual entre caudales simulados (mostaza) y observados (verde) en la etapa de calibración y validación en la Est. Río Blanco en el modelo RS Minerve.</i>	141
Figura 63. <i>Calibración y validación diaria con el modelo hidrológico RS Minerve en la cuenca alta del río Rímac en la Est. Río Blanco.</i>	142
Figura 64. <i>Calibración y validación mensual con el modelo hidrológico RS Minerve en la cuenca alta del río Rímac en la Est. Río Blanco.</i>	143
Figura 65. <i>Correlación lineal entre los caudales simulados (calibrados) y observados (aforos) en la Est. Río Blanco con el modelo RS Minerve.</i>	144

Figura 66. <i>Correlación lineal entre los caudales simulados (validados) y observados (aforos) en la Est. Río Blanco con el modelo RS Minerve.</i>	144
Figura 67. <i>Curva frecuencia de duración diaria del caudal simulado vs. observado en la Est. Río Blanco con el modelo RS Minerve.</i>	145
Figura 68. <i>Comparación visual entre el caudal simulado y observado en la Est. San Mateo con el modelo RS Minerve</i>	145
Figura 69. <i>Comparación visual entre el caudal simulado y observado en la Est. Tamboraque con el modelo RS Minerve</i>	145
Figura 70. <i>Comparación de barra entre el caudal simulado por el modelo SWAT y RS Minerve por subcuena</i>	146
Figura 71. <i>Comparación entre el caudal simulado por el modelo SWAT y RS Minerve de la cuenca alta del Río Rímac</i>	146
Figura 72. <i>Figura de Mapa de generación de caudales por subcuena en escenario base que muestra la distribución de generación de caudales por subcuena, notándose claramente las que más generan.</i>	151
Figura 73. <i>Caudal medio anual de salida por subcuena en escenario base.</i>	152
Figura 74. <i>Escorrentía media anual por subcuena en escenario base.</i>	153
Figura 75. <i>Figura de Mapa de generación de sedimentos por subcuena en escenario base que muestra la distribución de generación de sedimentos por subcuena, notándose claramente las que más generan.</i>	153
Figura 76. <i>Sedimentos medio anual por subcuena en escenario base.</i>	154
Figura 77. <i>Figura de Mapa de generación de sedimentos por URH en escenario base que muestra la distribución de generación de sedimentos por URH, notándose claramente las que más generan.</i> ..	155
Figura 78. <i>Sedimentos medio anual por URH (primeros 30) en escenario base.</i>	157
Figura 79. <i>Correlación lineal entre escorrentía y sedimentos por subcuena en escenario base.</i>	158
Figura 80. <i>Figura de Mapa de cobertura vegetal en escenario año 2030 muestra la distribución de cobertura vegetal proyectada para el año 2030.</i>	159

Figura 81. <i>Figura de Mapa de generación de caudales por subcuenca en escenario año 2030 (cambio de cobertura únicamente) que muestra la distribución de generación de caudales por subcuenca, notándose claramente las que más generan.</i>	162
Figura 82. <i>Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.</i>	163
Figura 83. <i>Escorrentía media anual por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.</i>	164
Figura 84. <i>Figura de Mapa de generación de sedimentos por subcuenca en escenario año 2030 (cambio de cobertura vegetal únicamente) que muestra la distribución de generación de sedimentos por subcuenca, notándose claramente las que más generan.</i>	165
Figura 85. <i>Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.</i>	165
Figura 86. <i>Figura de Mapa de generación de sedimentos por URH en escenario año 2030 (cambio de cobertura vegetal únicamente) que muestra la distribución de generación de sedimentos por URH, notándose claramente las que más generan.</i>	166
Figura 87. <i>Sedimentos medio anual por URH (primeros 30) en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.</i>	168
Figura 88. <i>Correlación lineal entre escorrentía y sedimentos por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.</i>	169
Figura 89. <i>Figura de Mapa de isotermas máxima media anual en escenario año 2030 que muestra la distribución de temperatura máxima proyectada para el año 2030.</i>	170
Figura 90. <i>Figura de Mapa de isotermas mínima media anual en escenario año 2030 que muestra la distribución de temperatura mínima proyectada para el año 2030.</i>	170
Figura 91. <i>Figura de Mapa de isoyetas media anual en escenario año 2030 que muestra la distribución de precipitación media anual proyectada para el año 2030.</i>	170
Figura 92. <i>Figura de Mapa de generación de caudales por subcuenca en escenario año 2030 (cambio climático únicamente) que muestra la distribución de generación de caudales por subcuenca, notándose claramente las que más generan.</i>	173

Figura 93. <i>Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.</i>	174
Figura 94. <i>Escorrentía media anual por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.</i>	175
Figura 95. <i>Figura de Mapa de generación de sedimentos por subcuenca en escenario año 2030 (cambio climático únicamente) que muestra la distribución de generación de sedimentos por subcuenca, notándose claramente las que más generan.</i>	175
Figura 96. <i>Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.</i>	176
Figura 97. <i>Figura de Mapa de generación de sedimentos por URH en escenario año 2030 (cambio climático únicamente) que muestra la distribución de generación de sedimentos por URH, notándose claramente las que más generan.</i>	177
Figura 98. <i>Sedimentos medio anual por URH (primeros 30) en escenario con cambio climático únicamente.</i>	179
Figura 99. <i>Correlación lineal entre escorrentía y sedimentos por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.</i>	180
Figura 100. <i>Figura de Mapa de generación de caudales por subcuenca en escenario año 2030 (cambio climático y de cobertura vegetal) que muestra la distribución de generación de caudales por subcuenca, notándose claramente las que más generan.</i>	183
Figura 101. <i>Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	184
Figura 102. <i>Escorrentía media anual por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	185
Figura 103. <i>Figura de Mapa de generación de sedimentos por subcuenca en escenario año 2030 (cambio climático y de cobertura vegetal) que muestra la distribución de generación de sedimentos por subcuenca, notándose claramente las que más generan.</i>	186
Figura 104. <i>Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	186

Figura 105. <i>Figura de Mapa de generación de sedimentos por URH en escenario año 2030 (cambio climático y de cobertura vegetal) que muestra la distribución de generación de sedimentos por URH, notándose claramente las que más generan.</i>	187
Figura 106. <i>Sedimentos medio anual por URH (primeros 30) en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	189
Figura 107. <i>Correlación lineal entre escorrentía y sedimentos por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	190
Figura 108. <i>Comparación de resultados de escorrentía medios mensuales para los 4 escenarios de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio).</i>	192
Figura 109. <i>Comparación de resultados de sedimentos medios mensuales para los 4 escenarios de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio).</i>	192
Figura 110. <i>Comparación de caudales medios anuales para los 4 escenarios por subcuenca.</i>	194
Figura 111. <i>Comparación de escorrentía media anual para los 4 escenarios por subcuenca.</i>	196
Figura 112. <i>Comparación de Sedimentos media anual para los 4 escenarios por subcuenca.</i>	197
Figura 113. <i>Comparación de sedimentos media anual para los 4 escenarios por URH.....</i>	198
Figura 114. <i>Relación entre la escorrentía y sedimentos en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario base a través del tiempo.</i>	200
Figura 115. <i>Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario de cambio de cobertura vegetal.</i>	201
Figura 116. <i>Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario de cambio climático.</i>	202
Figura 117. <i>Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario de cambio climático y de cobertura vegetal.</i>	203
Figura 118. <i>Comparación a través del tiempo de los resultados de caudales para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).</i>	206
Figura 119. <i>Comparación a través del tiempo de los resultados de escorrentía para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).</i>	208

Figura 120. *Comparación a través del tiempo de los resultados de sedimentos para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio)..... 210*

RESUMEN

Los procesos hidrológicos y sus cambios en la cuenca permiten estimar su comportamiento. En la presente tesis se expone la aplicación del modelo hidrológico SWAT sobre la cuenca alta del río Rímac para la estimación de caudales y sedimentos medios sobre escenarios actual y futuros de clima y cobertura vegetal. Se subdivide de la siguiente manera: Capítulo I sobre introducción y aspectos generales; Capítulo II sobre marco teórico; Capítulo III sobre metodología de investigación; Capítulo IV sobre resultados y desarrollo del estudio en sí; Capítulo V sobre discusión de resultados con otros estudios; y los Capítulos VI, VII Y VIII sobre conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas respectivamente. El estudio empieza con la compilación de datos, la configuración y calibración del modelo para luego validarlo con información de campo dando un $R^2 = 0.75$, Nash = 0.70 y PBias = +14.9% entre los caudales reales y simulados. Se corrió un escenario base dando un caudal medio anual de 6.09 m³/s y 586.41 Tm/Ha como generación de sedimentos medio anual. En el escenario de cambio de cobertura vegetal aumentaron los caudales y sedimentos, en el escenario de cambio climático disminuyeron los caudales y sedimentos y en el escenario de cambio de cobertura vegetal y climático también disminuyeron los caudales y sedimentos. Estos resultados se deben a que se proyectaron una disminución de precipitación en los andes centrales del Perú al año 2030 y los caudales están más influenciados por la precipitación (y temperatura) que por la cobertura vegetal.

Palabras clave: *ArcSWAT, caudales, cuenca alta del río Rímac, escorrentía, Modelamiento hidrológico, sedimentos, SWAT*

ABSTRACT

The Hydrological processes and their changes in the basin allow us to estimate their behavior. This thesis presents the application of the SWAT hydrological model on the upper basin of the Rímac River for the estimation of flows and average sediments under current and future climate and vegetation cover scenarios. It is subdivided as follows: Chapter I on introduction and general aspects; Chapter II on theoretical framework; Chapter III on research methodology; Chapter IV on results and development of the study itself; Chapter V on discussion of results with other studies; and Chapters VI, VII and VIII on conclusions, recommendations, and bibliographic references respectively. The study begins with the compilation of data, the configuration and calibration of the model and then validate it with field information giving an $R^2 = 0.75$, Nash = 0.70 and PBias = +14.9% between the real and simulated flows. A base scenario was run giving an average annual flow of 6.09 m³/s and 586.41 Tm/Ha as average annual sediment generation. In the vegetation cover change scenario, flows and sediments increased, in the climate change scenario, flows and sediments decreased, and in the vegetation cover and climate change scenario, flows and sediments also decreased. These results are since a decrease in precipitation was projected in the central Andes of Peru by 2030 and the flows are more influenced by precipitation (and temperature) than by vegetation cover.

Keywords: ArcSWAT, basin, Hydrological modeling, runoff, sediments, SWAT, upper Rímac river flows

RESUMÉ

Les processus hydrologiques et leurs évolutions dans le bassin permettent d'estimer leur comportement. Cette thèse présente l'application du modèle hydrologique SWAT sur le bassin supérieur de la rivière Rímac pour l'estimation des débits et des sédiments moyens dans des scénarios actuels et futurs de climat et de couverture végétale. Il est subdivisé comme suit : Chapitre I sur l'introduction et les aspects généraux ; Chapitre II sur le cadre théorique ; Chapitre III sur la méthodologie de recherche ; Chapitre IV sur les résultats et le développement de l'étude elle-même ; Chapitre V sur la discussion des résultats avec d'autres études ; et les chapitres VI, VII et VIII sur les conclusions, recommandations et références bibliographiques respectivement. L'étude commence par la compilation des données, la configuration et le calage du modèle puis le valide avec des informations de terrain donnant un $R^2 = 0,75$, Nash = 0,70 et PBias = +14,9% entre les flux réels et simulés. Un scénario de base a été exécuté donnant un débit annuel moyen de 6,09 m³/s et 586,41 Tm/ha de génération annuelle moyenne de sédiments. Dans le scénario de changement de couverture végétale, les débits et les sédiments ont augmenté, dans le scénario de changement climatique, les débits et les sédiments ont diminué, et dans le scénario de couverture végétale et de changement climatique, les débits et les sédiments ont également diminué. Ces résultats sont dus au fait qu'une diminution des précipitations était prévue dans les Andes centrales du Pérou d'ici 2030.

Mots-clés : ArcSWAT, bassin supérieur du Rímac, débits, Modélisation hydrologique, ruissellement, sédiments, SWAT

I: INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del problema

La producción de agua es uno de los procesos más relevantes en la evaluación de la sostenibilidad de cuencas hidrográficas. Se tienen diversos modelos de simulación para su evaluación y predicción cuantitativa en múltiples escenarios de suelo, clima, relieve, uso y manejo de la tierra.

Los cambios climáticos y procesos hidrológicos en la cuenca hidrográfica permiten estimar su grado de afectación, comportamiento y tendencias. Esto permitirá planificar y tomar decisiones a corto y mediano plazo.

Dentro de la gestión integrada de cuencas hidrográficas, la estimación de los caudales es esencial para evaluar su rendimiento potencial del agua con la finalidad de planificar las medidas de conservación del recurso hídrico, incluyendo zonas de recarga hídrica, reducción de la sedimentación y riesgos de inundación aguas abajo. Por esto, es necesaria la modelación de precipitación y caudales por medio de un modelo hidrológico, el cual debe ser calibrado adecuadamente con el fin de proporcionar información sistemática y coherente sobre la disponibilidad presente y futura de los recursos hídricos en la cuenca.

En las cuencas andinas las externalidades negativas como la generación de sedimentos, y disminución de agua, son causadas por el inadecuado manejo del suelo en actividades productivas que apresuran los procesos erosivos y disminuyen la capacidad de retención. En los Andes las zonas de fuertes pendientes aumentan mayormente estas externalidades.

La cuantificación del transporte sólido (sedimentos) es muy importante en estudios de ingeniería, diques, puentes, presas, entre otros y, al mismo tiempo, es un trabajo muy difícil de realizar. El costo de las mediciones del transporte sólido es alto, y requiere además un largo proceso de monitoreo dada su extrema variabilidad, por lo que su precisión puede ser baja. En

la medición en campo de los sedimentos no verifica su movimiento sobre una corriente, es decir, no se sabe de dónde procede el suelo, ni cuándo se produjo el movimiento.

El problema es conocer los aportes de caudales y sedimentos medios de los afluentes que llegan al río principal, así como también determinar los usos de suelo y tipos de cobertura vegetal que lo producen de manera extraordinaria. La modelación hidrológica generará los mapas de dirección de flujo y zonas de mayor generación de sedimentos.

Las zonas de estudio que son explotadas en una forma tradicional ineficiente con una fuerte presión sobre los recursos naturales del mismo provocan una disminución de la calidad, especialmente de la cobertura vegetal, que conlleva en la erosión de los suelos, disminución de su fertilidad y arrastre de sólidos hacia los flujos de agua. Un deficiente manejo de cobertura vegetal en la cuenca alta puede provocar una alta producción de sedimentos que afectará notablemente la cuenca baja, por ejemplo, en la cuenca Catamayo-Chira en Ecuador cuyos efectos de sedimentos se evidencia en la cuenca baja en Perú, colmatando prematuramente el embalse de Poechos en Piura.

En la actualidad los proyectos hidráulicos de la cuenca baja sufren de los sedimentos generados de las partes altas, ya sea colmatando presas, diques o el mismo río, así como dificultando la potabilización del agua en las plantas de tratamiento, sobre todo en eventos extremos (huaicos en fenómeno del niño). Se sabe que en los últimos cinco años el costo de purificación del agua subió al menos entre 30% y 40 %, no necesariamente por la mala gestión de la cuenca, aunque sumaría. La elección de la cuenca alta del río Rímac para la presente investigación es por ser el principal aportante de caudales y sedimentos a la capital peruana por su alta precipitación y escasa vegetación (ambos influenciados por su gran altitud).

Las medidas de prevención de deslizamientos son muy conocidas, aplicándolos se reduciría fuertemente la generación de sedimentos y estos a su vez reducirían el costo de

mantenimiento aumentando el tiempo de vida de las infraestructuras hidráulicas en la cuenca. En la cuenca del río Rímac no se ha invertido en estudios que identifiquen las zonas de mayor generación de sedimentos, y por tanto no se sabe dónde aplicar las medidas de prevención para reducirlos, solo se conoce las quebradas que usualmente se activan en época de huaicos, pero no se tienen estudiado su impacto numérico (Tn/Ha). Las medidas de prevención de deslizamientos para reducción de sedimentos se podrían aplicar una vez identificadas las subcuencas que más sedimentos generan, que usualmente son: construcción de dique, dren, gavión, muro de contención, espigón en quebrada y obras de arte de protección, así como descolmatación, enrocado, reforestación, compuerta metálica de evacuación, rehabilitación de bocatoma y de infraestructura de riego y reforzamiento de dique de contención, entre otros. Es decir, con la ubicación de las zonas de mayor generación de sedimentos se espera contribuir con la toma de decisiones en alternativas de solución que ayude a alargar el tiempo de vida de los proyectos hidráulicos (como la represa en la laguna Yuracmayo) sobre el cauce del río principal (por transportar menor cantidad de sedimentos a colmatarse), así como la preservación del suelo (al degradarse menos).

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 Problema principal.

- ¿Como la aplicación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Rímac podrá estimar cuantitativa y espacialmente la generación de caudales y sedimentos medios?

1.1.2.2 Problemas secundarios.

- ¿De qué forma se puede validar la estimación cuantitativa y espacial de generación de caudales y sedimentos medios obtenidos en la aplicación del modelo hidrológica SWAT?
- ¿Cómo influye el actual escenario climático y de cobertura vegetal en la generación de caudales y sedimentos medios?
- ¿Cómo influye un futuro escenario climático y de cobertura vegetal en la generación de caudales y sedimentos medios?

1.2 Antecedentes

1.2.1 Antecedentes Nacionales

Salas (2019). *Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca mediante el uso del modelo SWAT.*

En la actualidad, la capacidad productiva del suelo se ve afectada por los procesos erosivos, lo que tiene un impacto directo en la economía local del distrito de Pitumarca. La orografía accidentada y los factores climáticos anómalos aumentan la producción de sedimentos en la cuenca, lo que, junto con otros factores como la falta de cobertura vegetal, la erosión del suelo y el uso inadecuado del mismo puede ocasionar catástrofes ambientales y económicas.

Se usó en el estudio el modelo hidrológico SWAT para medir el grado de erosión en la cuenca y calcular el volumen de pérdida de suelo por hectárea y por año. Se ha llevado a cabo la calibración y validación del modelo mediante la herramienta SWAT-CUP para garantizar un buen rendimiento en las simulaciones.

Para la elaboración del modelo se han registrado datos climáticos e hidrológicos, y se han utilizado redes neuronales y el producto PISCO para completar los datos climáticos

faltantes. Además, se han interpolado valores y se han obtenido estaciones simuladas dentro de la cuenca para elaborar una base de datos climáticos que se ha utilizado en el modelo hidrológico. Se han utilizado imágenes satelitales y un sistema de información geográfico (SIG), y se han extraído los DEM de la página del USGS y se ha utilizado el programa QGIS.

El modelo permite ubicar las zonas con alto grado de erosión y proponer medidas de mitigación según las características de cada zona, como la reforestación, la construcción de estructuras hidráulicas y la tecnificación de cultivos. Estas medidas contemplan el fomento del desarrollo, mejorando la competitividad y el crecimiento del distrito de Pitumarca.

Cuadros (2020). *Modelamiento hidrológico de la subcuenca del río Pachachaca con precipitación proveniente de satélite, Departamento de Apurímac.*

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar la modelización hidrológica y evaluar la utilidad de la precipitación satelital para estimar el suministro de agua en la subcuenca del río Pachachaca en el Departamento de Apurímac. Para ello, se ha utilizado el PISCO (Datos interpolados peruanos de las Observaciones Climatológicas e Hidrológicas del SENAMHI), CHIRPS (Grupo de Peligros Climáticos de Precipitación Infrarroja con Estaciones) y TRMM (Misión de Medición de la Lluvia Tropical), así como el método de corrección de sesgo utilizando precipitaciones observadas estadísticamente homogéneas en una serie histórica de datos diarios del 01/01/1998 al 31/12/2013. Se ha calculado la corrección de los productos de precipitación satelital, encontrando estadísticamente que el producto PISCO y los datos originales del producto PISCO son más similares a la precipitación observada.

Para la modelización hidrológica, se ha utilizado el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para simular las tasas de flujo diarias tanto para el período de calibración (01/01/2006 al 31/12/2006) como para la validación (02/01/2012 al 31/12/2012).

Los resultados muestran que el producto PISCO ($r = 0,94$, PBIAS = 13,36, NSE = 0,85, RSR = 0,38 y RMSE = 44,42), PISCO ($r = 0,91$, PBIAS = 26,48, NSE = 0,73, RSR = 0,52 y RMSE = 60,45) y CHIRPS ($r = 0,86$, PBIAS = 23,75, NSE = 0,62, RSR = 0,62 y RMSE = 71,48) tienen mejores resultados en la etapa de calibración, mientras que PISCOcorr ($r = 0,76$, PBIAS = -13,24, NSE = 0,53, RSR = 0,71 y RMSE = 110,11), PISCO ($r = 0,78$, PBIAS = 6,21, NSE = 0,61, RSR = 0,65 y RMSE = 100,81) y CHIRPS ($r = 0,81$, PBIAS = 26,01, NSE = 0,63, RSR = 0,63 y RMSE = 97,78) tienen mejores resultados en la etapa de validación.

Asurza-Véliz et al. (2020). *Regional Parameter Estimation of the SWAT Model: Methodology and Application to River Basins in the Peruvian Pacific Drainage.*

Este estudio presenta una metodología para la estimación de parámetros regionales del modelo SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua), con el objetivo de estimar las series diarias de flujo en el drenaje del Pacífico en el contexto de una limitada disponibilidad de datos hidrológicos. Esta metodología ha sido diseñada para obtener los parámetros del modelo a partir de un número limitado de cuencas (14) y finalmente regionalizarlos en cuencas sin datos hidrológicos basándose en características físico-climáticas. Además, se seleccionó el método de *bootstrapping* para estimar la incertidumbre asociada a la selección del conjunto de parámetros en el proceso de regionalización. En general, los parámetros regionalizados reducen la subestimación inicial, lo que se refleja en una mejor cuantificación de los flujos diarios y mejoran el rendimiento de los flujos bajos. Además, los resultados muestran que el modelo SWAT representa correctamente el balance hídrico y la estacionalidad de los componentes principales del ciclo hidrológico. Sin embargo, el modelo no cuantifica correctamente las tasas de flujo elevadas durante los períodos húmedos. Estos hallazgos proporcionan información de apoyo para estudios sobre el balance hídrico y la gestión del agua en el drenaje del Pacífico

peruano. El enfoque y los métodos desarrollados pueden ser replicados en cualquier otra región del Perú.

Quispe et al. (2021). *Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca Ilave bajo escenarios del cambio climático.*

Actualmente, los cambios drásticos en el clima están amenazando la demanda de agua, aumentando la presión en cantidad y calidad sobre los recursos hídricos disponibles a nivel mundial. Esta investigación se llevó a cabo en el área de los Andes peruanos, con el objetivo de evaluar la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca de Ilave bajo escenarios de cambio climático, con el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). La calibración y validación del modelo SWAT se realizó durante un período de 30 años (1986-2016) utilizando datos diarios de clima y caudales diarios. Para la evaluación futura, se adoptaron los datos de los modelos climáticos globales (MCG) MIROC6 y MPI-ESM1-2-LR del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) en los escenarios de trayectoria SSP4.5 y SSP8.5, los datos futuros de los MCG (2025-2050) se redujeron en DAWSALING. La precipitación en los escenarios de cambio climático proyecta una disminución de -38,08 mm a -0,29 mm, la mayor disminución en la precipitación ocurre en la temporada de lluvias y aumentos en la temporada seca, la temperatura máxima aumenta en 0,06 °C y la temperatura mínima disminuye en -0,20%. En cuanto al caudal, se predice una disminución en el recurso hídrico en la temporada de lluvias, variando entre -41,2% y 40,0%, mientras que para la temporada seca se proyecta una disminución de -33,8% a -0,1%. Así, las variaciones en temperatura y precipitación se reflejan en el caudal, concluyendo que el recurso hídrico disminuirá en un -41,2% para el año 2050.

Villar (2022). *Desarrollo de un sistema de monitoreo para la evaluación de intervenciones en la infraestructura natural por medio de la observación de la tierra.*

Se encontraron condiciones climáticas desfavorables en la microcuenca Yuracmayo y los humedales estudiados presentaron tasas de infiltración moderadamente lentas a moderadamente rápidas con contenido de materia orgánica superior al 50%. Se está perdiendo la capacidad de regulación hídrica y capacidad aportante a la represa a escala cuenca, por lo que es necesario promover intervenciones que aseguren el cuidado y recuperación de los humedales.

La tasa de infiltración es un indicador clave que se debe considerar prioritariamente en un próximo sistema de monitoreo para saber el estado de compactación del suelo y si la intervención mejoró la tasa de infiltración. Se deberá reunir esfuerzos en rehabilitar todas las zanjas de infiltración y asegurar su mantenimiento. El estudio abarca la compilación de información base y su organización para el análisis de futuros proyectos en la microcuenca Yuracmayo, y contribuye a proponer indicadores para la continuidad de su uso en sistemas de monitoreo. Es importante reforzar los esfuerzos de monitoreo y la interacción de todo el sistema: intervención, subcuenca y represa para entender la necesidad de elaborar un sistema de monitoreo complejo que refleje los resultados de una intervención.

1.2.2 Antecedentes Internacionales

Chadli (2018). *Hydrological modeling of the Mikkés watershed (Morocco) using ARCSWAT model.*

Este estudio tiene como objetivo contribuir a la gestión de los recursos hídricos en la cuenca de Mikke utilizando el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Este modelo requiere varios datos de entrada, como lluvia, temperatura, modelo digital de elevación, características del suelo y uso del suelo. Las salidas del modelo son el balance hídrico y la carga de sedimentos en la subcuenca. El modelo SWAT se ejecutó y calibró utilizando el

método de Ajuste Secuencial de Incertidumbres (SUFI-2) en el software SWAT-CUP para el período 1979-2007, con una eficiencia del modelo ajustado evaluada como buena (NSE = 0,67, PBIAS = 6,78, RSR = 0,56). El balance de agua generado por el modelo muestra una dominancia de la evapotranspiración, que representa el 65% de la lluvia, mientras que el escurrimiento superficial es del 15% y la recarga total del acuífero es del 20%. El modelo indica que la carga de sedimentos es mayor en el área sur de la cuenca, debido al alta pendiente, alta precipitación, uso del suelo y suelos erosionables. Estos resultados revelaron que el modelo hidrológico puede ser utilizado eficientemente para apoyar la gestión integrada de la cuenca.

Xu et al. (2018). *Runoff response to climate change and human activities in a typical karst watershed, SW China.*

El estudio tiene como objetivo revelar las características de variación del escurrimiento en largas series de tiempo en una región kárstica, analizar de manera integral sus diferentes factores impulsores y estimar cuantitativamente las tasas de contribución del cambio climático y las actividades humanas a la variación neta del escurrimiento. La cuenca del río Liudong, una cuenca hidrográfica kárstica típica en el suroeste de China, es el sitio de estudio. Se aplican métodos estadísticos como el ajuste lineal, el análisis de ondículas de Morlet, la curva normalizada y la curva de doble masa para analizar el escurrimiento de la cuenca hidrográfica. Los resultados muestran que el escurrimiento en la cuenca kárstica durante el período de investigación presenta un cambio en tres etapas y los puntos de cambio abrupto son los años 1981 y 2007: (1) 1968-1980, el escurrimiento inicialmente mostró una tendencia de disminución sostenida y luego una fluctuación abrupta. El escurrimiento fue claramente destruido a través de procesos de producción de precipitaciones. La utilización inadecuada de la tierra y la destrucción grave de los bosques y pastizales intensificaron la amplitud de la variación de fluctuación del escurrimiento. (2) 1981-2006, los procesos de cambio del

escurrimiento y la precipitación mostraron una buena sincronización. La precipitación afectó significativamente la variación del escurrimiento y las actividades humanas tuvieron un grado de interferencia leve. (3) 2007-2013, el rango de fluctuación del escurrimiento fue considerablemente menor que el de la precipitación. El crecimiento significativo de las áreas de bosques y pastizales y el aumento del consumo de agua mitigaron la fluctuación del escurrimiento y redujeron en gran medida la amplitud de la variación del escurrimiento. Según el cálculo, las tasas de contribución relativa de la precipitación y las actividades humanas a la variación neta del escurrimiento con 1981-2007 como período de referencia fueron del -81% y del 181% en promedio, respectivamente, durante 1968-1980, y del -117% y del 217% en promedio, respectivamente, durante 2007-2013. En general, el análisis de la tendencia de variación del escurrimiento y de la tasa de contribución de sus principales factores influyentes en la cuenca hidrográfica kárstica típica durante casi medio siglo puede ser significativo para resolver el problema de la sequía en la región kárstica y para el desarrollo sostenible de la cuenca hidrográfica.

Gutierrez et al. (2018). *Modelo de sequía en la quebrada aguas claras en el municipio de San Bernardo Cundinamarca a través del programa hidrológico SWAT mediante aplicación de herramientas digitales UAVS.*

El estudio consiste en llevar a cabo una modelización y simulación mediante la herramienta de evaluación del agua y suelo en una cuenca hidrográfica (SWAT) del arroyo Aguas Claras, ubicado en el municipio de San Bernardo, Cundinamarca, debido a una notable disminución de sus caudales, lo que ha provocado sequías en la zona que han generado graves afectaciones a las personas que viven en este municipio.

El proceso para elaborar el modelo implica la recolección de datos, incluyendo características climáticas, topográficas y otras del área. La información topográfica se obtuvo

a través de sistemas tripulados no aéreos, mejor conocidos como drones, así como mediante métodos convencionales. Después de obtener todos los datos, es necesario verificar la información y, si es necesario, depurarla antes de realizar la modelización, la cual se calibra con datos reales con el fin de simular el comportamiento de las sequías en esta área durante un período de cinco años.

En la investigación también se llevó a cabo un análisis detallado de la implementación de un modelo de sequía a partir de dos métodos diferentes para estudiar la información topográfica, lo que permitió un análisis del comportamiento del arroyo, con el objetivo de proporcionar una fuente de información valiosa para tomar decisiones correctas y oportunas, evitando problemas socioeconómicos y ambientales en este municipio.

Con los resultados se determina que las sequías que pueden presentarse en el área de estudio, aunque no son graves, son importantes de analizar y monitorear. Además, se puede ver que el modelo de sequía de los vehículos no tripulados (UAV) muestra un buen rendimiento tanto en la calibración como en la validación, por lo que la implementación de este tipo de herramientas en los modelos hidrológicos puede ayudar a mejorar las simulaciones. Por lo tanto, este modelo puede contribuir a un estudio de las sequías en la región de Sumapaz proporcionando una nueva herramienta para la planificación y gestión de los recursos hídricos.

Montecelos (2018). *Modelación del efecto de la variación climática en el balance hídrico en dos cuencas (México y Cuba) bajo un escenario de cambio climático.*

Este estudio propuso una parametrización para el modelo hidrológico SWAT (Herramienta de Evaluación del Agua y el Suelo) para evaluar los impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua en la cuenca del río Cauto, ubicada al sureste de Cuba, y en la cuenca del Guadalupe, ubicada en el noroeste de México. SWAT fue calibrado y validado en las dos cuencas obteniendo un buen rendimiento según tres métricas de habilidad:

el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación (R^2) y el sesgo porcentual (PBIAS). Se identificaron los parámetros que mejor describen las características físicas en la hidrología de las regiones. Los resultados del modelo revelaron los procesos de escorrentía superficial en la hidrología de la cuenca del río Cauto, mientras que en el río Guadalupe los parámetros relevantes fueron los del flujo base. Los parámetros calibrados tenían diferentes rangos de valores en cada región, lo que refleja una diferencia en los mecanismos generadores de escorrentía en las dos cuencas. Los efectos del cambio climático se evaluaron forzando el modelo SWAT calibrado con el Modelo Climático Regional (MCR) RegCM4.3 durante un período de referencia (1970-2000) y un período futuro (2015-2039) bajo el escenario de alta emisión RCP 8.5. Las proyecciones futuras en la cuenca del río Cauto sugieren aumentos regionales de 1.5°C en la temperatura media anual y una disminución del 38% en la precipitación media anual. Estos cambios se vuelven en posibles reducciones en el caudal anual de hasta el 61% en relación al período de referencia, mientras que se espera que la recarga de acuíferos en la cuenca disminuya hasta el 59%, con la consiguiente reducción del flujo de aguas subterráneas. Por otro lado, en la cuenca del Guadalupe, se espera un posible aumento anual del 8% de la precipitación y 1.2°C en la temperatura media anual. Estos cambios podrían afectar negativamente el flujo y la recarga total del acuífero en la cuenca del Guadalupe en un -36% y -55%, respectivamente: mientras que la evapotranspiración anual podría aumentar un 16%, relacionado con el aumento de la temperatura proyectada. Estos escenarios de proyección pueden ser de interés para los gestores del agua en las dos regiones. La principal contribución de esta tesis es la evaluación de las principales diferencias entre los procesos hidrológicos en las cuencas de los ríos Cauto y Guadalupe, además de ser la primera vez que se realiza un modelado hidro-climático combinado (SWAT y RegCM4) en estas cuencas.

Gallo et al. (2018). *Modelamiento con SWAT y GR2M para la subcuenca del río Guayllabamba.*

El crecimiento demográfico y la expansión urbana influyen sobre los recursos hídricos en la subcuenca del río Guayllabamba (SRG). Actualmente, la demanda de este suministro ha aumentado, afectando las fuentes de superficie, subterráneas, de recarga y de lecho fluvial. Por esta razón, se llevó a cabo un modelado hidrológico en la SRG con el fin de conocer el comportamiento del flujo en la zona. En el estudio, se compararon dos modelos hidrológicos: SWAT (semi-distribuido) y GR2M (agregado), con un período de 22 años (1983-2004) para la calibración y 9 años (2005-2013) para la validación, evaluados por el índice de Nash-Sutcliffe y el coeficiente de determinación (R^2). Se consideraron los datos de precipitación y temperatura de diecinueve estaciones meteorológicas y uno hidrológico. Para GR2M se demandó información hidro-meteorológica mensual y para SWAT se usó los del motor climático "Reanálisis del sistema de pronóstico climático" para el período 1982-2013. El modelo GR2M logró una eficiencia satisfactoria, tanto para el período de calibración como el de validación, con un coeficiente Nash y R^2 superior a 0,60. Por otro parte, SWAT presentó criterios de evaluación inferiores al rango pedido, calificándolo como "pobre" para la representación de flujos en el área de estudio. En resumen, se puede señalar que GR2M, al ser un modelo de lluvia-escorrentamiento que no considera factores de cuenca como: uso y tipo de suelo, pendiente, puede generar resultados más eficientes en simulación que el modelo SWAT.

Swain (2019). *Impact assessment of land use / land cover and climate change on streamflow regionalization in an ungauged catchment.*

La variación en el uso de la tierra y la cobertura de la tierra (LULC) y el clima tienen un impacto directo en la precisión de cualquier predicción hidrológica. Sin embargo, la cuantificación del efecto de estos dos factores en un entorno de cuenca no monitoreada se discute menos. La herramienta de evaluación de suelo y agua (SWAT) en combinación con dos

técnicas de regionalización, es decir, el peso inverso de la distancia (IDW) y la kriging, se aplicaron en 32 cuencas en India donde cada cuenca se consideró no monitoreada al menos una vez. Los impactos combinados y aislados del cambio en el uso de la tierra y la cobertura de la tierra (LULCC) y la variabilidad del clima en el flujo del arroyo para el período de 1990-2011 se cuantificaron a escala anual a través de cuatro casos diferentes. Se obtuvieron resultados satisfactorios de SWAT para el análisis tanto del conjunto de monitoreados como del no monitoreado. Los resultados generales sugieren que, debido a la influencia de los efectos combinados del LULCC y la variabilidad del clima, hubo una disminución en el volumen anual del flujo del arroyo en más del 21% desde el primer período (1990-2000) hasta el segundo período (2001-2011) en la cuenca seleccionada tratada como no monitoreada. El factor climático variable oscureció el efecto del LULCC. El resultado puede estar relacionado con el aumento de la temperatura y la disminución del volumen de lluvia, lo cual es distintivo en un país dominado por el monzón como La India.

Khayyun et al. (2019). *Hydrological model for Hemren dam reservoir catchment area at the middle River Diyala reach in Iraq using ArcSWAT model.*

En este estudio se simula el escurrimiento del área de captación de la presa de Hemren en la zona media del río Diyala, más allá de la presa Derbendi-Khan, al noreste de Irak, utilizando el modelo Soil Water Assessment Tool (ArcSWAT-2012) integrado con sistemas de teledetección y de información geográfica. El modelo se calibró en un paso de tiempo mensual para el período comprendido entre 1981 y 2000, con un período de calentamiento de 2 años, y se validó con el flujo de corriente observado para los años entre 2001 y 2008. La calibración del modelo y el análisis de sensibilidad de los parámetros se llevaron a cabo utilizando el método de calibración automática dentro del programa SWAT-CUP. El rendimiento del modelo para el área de captación estudiada se evaluó mediante muchos criterios estadísticos.

En general, el rendimiento del modelo fue bueno. Los resultados del análisis de sensibilidad mostraron que hay siete parámetros que afectan principalmente a los procesos hidrológicos en la cuenca estudiada; estos fueron ALPHA_BF, CH_K2, CN2, CH_N2, SOL_AWC, REVAPMN y GW_REVAP. Los resultados mostraron que el escurrimiento efectivo ocurre en las estaciones húmedas, y que no hay un flujo de base efectivo continuo desde la cuenca estudiada, y que el volumen anual promedio de entrada a la presa de Hemren durante el período de simulación fue de 0,871 BCM, es decir, el 17,42% del volumen total de entrada a la presa de Hemren. Además, se encontró que es posible utilizar el sistema de pronóstico climático de reanálisis de datos de estaciones meteorológicas globales en el área de captación estudiada. Por último, se determinó una fórmula de regresión directa simple mediante la correlación del volumen mensual de escurrimiento con la profundidad mensual de la lluvia.

Sok et al. (2020). *Assessment of Hydrology and Sediment Yield in the Mekong River Basin Using SWAT Model.*

La cuenca del río Mekong es uno de los 10 más largos del mundo. En el estudio se usó el modelo SWAT para determinar la carga de sedimentos de sus ríos tributarios en una cuenca muy grande. El modelo fue calibrado y validado para los años 1985 al 2016. La carga de sedimentos media anual de la cuenca integral fue de 310 t/km². El mapa derivado de este estudio ilustra explícitamente la identificación y priorización de áreas críticas de erosión del suelo.

Zhang et al. (2020). *Influence of Land Use Change on Hydrological Cycle: Application of SWAT to Su-Mi-Huai Area in Beijing, China.*

Las actividades humanas y el proceso de urbanización han cambiado la superficie subyacente de las áreas urbanas, lo que afectaría la recarga de agua subterránea a través de la

infiltración de la lluvia y podría influir aún más en el medio ambiente del agua subterránea. Por lo tanto, es imperativo investigar la variación del ciclo hidrológico en condiciones de cambio de superficie subyacente. Basándose en los datos de teledetección de alta precisión de 2000, 2005, 2010 y 2015, y el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), este trabajo estudió en primer lugar el cambio de uso de la tierra y los cambios correspondientes en el mecanismo de generación de escorrentía y el coeficiente de infiltración de la lluvia en el área de Su-Mi-Huai, Beijing, China. Mientras tanto, se aplicó el modelo de acoplamiento semi-flojo SWAT-MODFLOW para analizar el balance de agua en el área de estudio en años hidrológicos típicos. Los resultados mostraron que el área de la tierra de construcción (tierra residencial urbana y rural) aumentó en 1.04 veces desde 2000 hasta 2015, lo que se atribuye principalmente a la conversión de tierras cultivables en tierras de construcción en la zona llana. Este cambio causó que la escorrentía en el área aumentara en 7×10^6 m³, el coeficiente de escorrentía aumentó en un 17.9%, y el coeficiente de infiltración de la precipitación fue menor que el valor empírico determinado por la litología. En comparación con 2000, el coeficiente de infiltración anual promedio de la precipitación en 2018 disminuyó en un 6.5%. Bajo la influencia del proceso de urbanización, la tasa máxima de reducción de la recarga de infiltración de precipitación es de hasta el 38%. El estudio investigó la respuesta de la escorrentía superficial y la recarga de infiltración de precipitación al cambio de uso de la tierra, lo que puede proporcionar ayuda a los administradores de recursos hídricos para coordinar la relación entre el cambio de uso de la tierra y la planificación racional de los recursos hídricos.

Oliveira et al. (2021). *Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model.*

El estudio se centró en una cuenca en la Amazonía brasileña y tuvo tres objetivos: (1) realizar un diagnóstico efectivo del flujo y la producción de sedimentos, (2) evaluar los

impactos de los cambios en uso de la tierra y la cobertura de la tierra LULC en los últimos 40 años sobre las variables hidro-sedimentológicas, y (3) investigar los impactos de las posibles tendencias o puntos de quiebre en las series de flujo, escorrentía superficial y producción de sedimentos. La validación del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) mostró que los resultados simulados fueron consistentes con los datos medidos en la reproducción dinámica de la estacionalidad del flujo. Además, los cambios en LULC alteraron la escorrentía superficial, la producción de sedimentos y el flujo de acuerdo con las pruebas no paramétricas de Mann-Kendall y Pettitt. También se observó que las subcuencas en las que predomina el pastizal son más susceptibles al aumento de la escorrentía superficial y la producción de sedimentos. Según las pruebas de tendencia y homogeneidad, estas subcuencas tenían puntos de quiebre en la serie temporal de estas variables. Por otro lado, en las subcuencas cuya cobertura de tierra es predominantemente forestal, la serie temporal es homogénea y sin tendencia. El estudio actual destacó los impactos que 40 años de cambios LULC en una cuenca amazónica tuvieron sobre las variables hidrosedimentológicas, las cuales, a su vez, pueden desempeñar un papel importante en el cambio del ciclo hidrológico, por lo que estos cambios también pueden afectar diversas actividades humanas en la región, como la agroindustria, la ganadería, la producción de energía, la seguridad alimentaria y el suministro público de agua. Así, se concluye que el modelo SWAT es un buen estimador de los procesos hidrosedimentológicos en las cuencas amazónicas y puede ser utilizado por los tomadores de decisiones en la gestión de los recursos hídricos y ambientales.

Mohammed (2022). *Diagnosing challenges and setting priorities for sustainable water resource management under climate change.*

En el estudio se demostró como el cambio climático está obligando la construcción de represas en la región de Mekong en Indo-Asia. El cambio climático originaría un aumento en

las precipitaciones que conducirían un aumento en el caudal y sedimentos que obligan operaciones en las represas para mantener flujos constantes y evitar inundaciones. El estudio también advierte que será necesario una mejor gobernanza del agua en los países de Laos, Vietnam y Camboya.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Aplicar el modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Rímac para estimar cuantitativa y espacialmente la generación de caudales y sedimentos medios.

1.3.2 Objetivos específicos

- Validar la estimación cuantitativa y espacial de la generación de caudales y sedimentos medios obtenidos en la aplicación del modelo hidrológico SWAT.
- Estimar como influye el actual escenario climático y de cobertura vegetal en la generación de caudales y sedimentos medios.
- Evaluar cómo influye un futuro escenario climático y de cobertura vegetal en la generación de caudales y sedimentos medios.

1.4 Justificación

El conocimiento de los procesos hidrológicos y sus componentes de precipitación, interceptación, escurrimiento, evaporación, transpiración y otros procesos subsuperficiales, al igual que los cambios que ocurren sobre las cuencas hidrográficas, permiten establecer su grado de afectación, su comportamiento y predecir las tendencias de cambio; conocer esta información resulta muy útil en los procesos de planificación y toma de decisiones en el corto y mediano plazo en las cuencas hidrográficas.

El presente estudio nos ayudará a entender la dinámica hidrológica de la cuenca alta del río Rímac entendiendo las zonas de mayor generación de caudales y sedimentos, permitiendo el planteamiento de soluciones por parte de las autoridades competentes. La ejecución del modelo hidrológico SWAT sobre un futuro escenario climático y de cobertura vegetal dará una idea con base científica sobre la tendencia de la cuenca para los siguientes años, así como una proyección de las zonas a priorizar por parte de las autoridades competentes.

Se escogió la cuenca alta del río Rímac, por ser la cuenca más importante en el desarrollo económico de la capital y alrededores, por ser la principal fuente de abastecimiento del agua potable en Lima y Callao, por ser representativas para la zona de la vertiente del Pacífico central y contar con la información hidro-meteorológica necesaria que exige el modelo, además de ser una cuenca muy estudiada.

Por sus características dentro de los diversos modelos hidrológicos de simulación continua, el modelo SWAT ha sido escogido para la realización de esta investigación por permitir pronosticar el impacto del manejo del suelo en la generación de caudales y sedimentos en las cuencas hidrográficas, así como calcular cuantitativa y espacialmente la pérdida del suelo (producción de sedimentos). El modelo SWAT es altamente flexible y puede usarse desde pequeñas cuencas (cientos de hectáreas) a grandes (miles de kilómetros cuadrados) y ha sido utilizado alrededor del mundo con buenos resultados (se corrobora que los resultados de sedimentos arrojados por el modelo son similares a los obtenidos en el trabajo de campo).

El presente tema de tesis aporte antecedentes a la COP25, estudios de disponibilidad hídrica, agua virtual y cotización del agua en los mercados.

1.4.1 Importancia

La predicción de la esorrentía (caudal) y pérdida de suelo (sedimentos) es importante para la evaluación de peligros de erosión del suelo, para determinar el manejo óptimo y medidas de conservación del suelo en una cuenca (conservar su calidad). En este sentido, este estudio producirá una alternativa de solución que contribuirá en una colmatación más lenta en los proyectos hidráulicos de la cuenca alta del río Rímac, como es el caso de la reserva de la laguna Yuracmayo en la subcuenca Río Blanco.

Con la aplicación del modelo hidrológico SWAT se conocerán los aportes cuantitativos de caudal y sedimentos de las diferentes subcuencas y URH, de la cuenca alta del río Rímac, y con esto poder hacer una priorización de zonas que más urgen proponer una alternativa de solución para disminuir la generación de sedimentos sin comprometer demasiado su producción de agua (caudal).

El presente estudio contribuye en la correcta toma decisiones y acciones políticas de las diferentes autoridades locales y regionales de la provincia de Huarochirí en la región Lima que lleven a su conservación y/o mejoramiento del recurso hídrico. La principal autoridad interesada es el Consejo de Recursos Hídricos de la Cuenca Chillón - Rímac - Lurín, conformado por representantes de los gobiernos regionales, la Autoridad Administrativa del Agua Cañete-Fortaleza de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), universidades, organizaciones de usuarios agrarios y no agrarios, gobiernos locales, de las comunidades campesinas y de los colegios profesionales.

Este estudio pretende proveer una base para futuros estudios concernientes al agua y administración de estrategias para el recurso del agua en la provincia de Huarochirí en la región de Lima.

1.5 Hipótesis

La hipótesis nos indica lo que estamos tratando o buscando de probar y pueden definirse como explicaciones tentativas del fenómeno investigativo y son formuladas a manera de proposiciones.

1.5.1 Hipótesis general

El modelo SWAT es una herramienta para evaluar el comportamiento del agua en una cuenca hidrográfica en diferentes escenarios, es por esto por lo que se plantea la siguiente hipótesis:

Hipótesis nula

“La aplicación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Rímac no podría estimar cuantitativa y espacialmente la generación de caudales y sedimentos medios”.

Hipótesis alterna

“La aplicación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Rímac permitirá una adecuada estimación cuantitativa y espacial de la generación de caudales y sedimentos medios”.

II: MARCO TEÓRICO

2.1 Bases teóricas

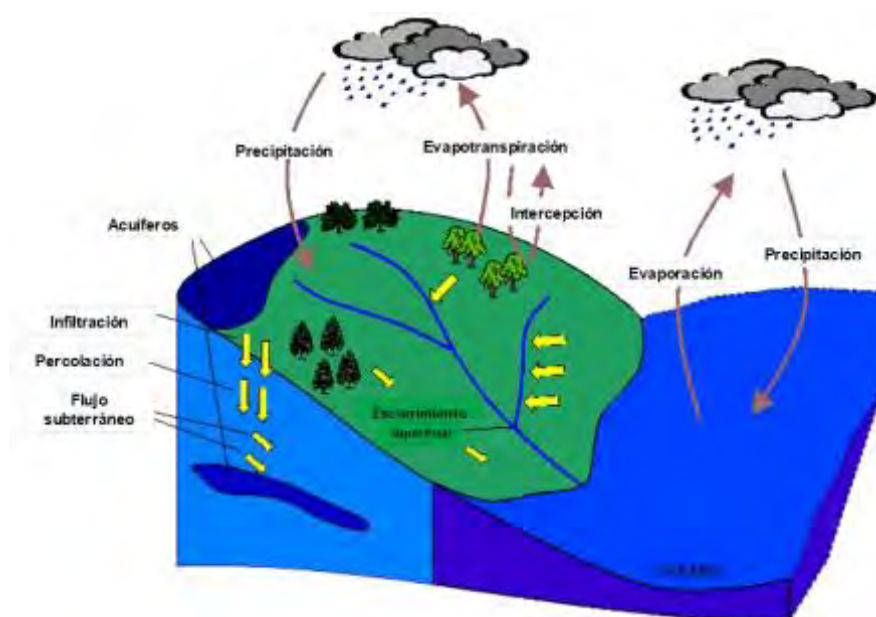
2.1.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y volver a la tierra: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y revaloración.

El ciclo hidrológico es un proceso de transporte recirculatorio e indefinido, este movimiento eterno del ciclo se debe fundamentalmente por dos razones: la primera, el sol proporcionando la energía para evaporar el agua; la segunda, la gravedad, que hace que el agua condensada descienda en precipitación y escurrimiento.

Figura 1.

Representación del ciclo hidrológico



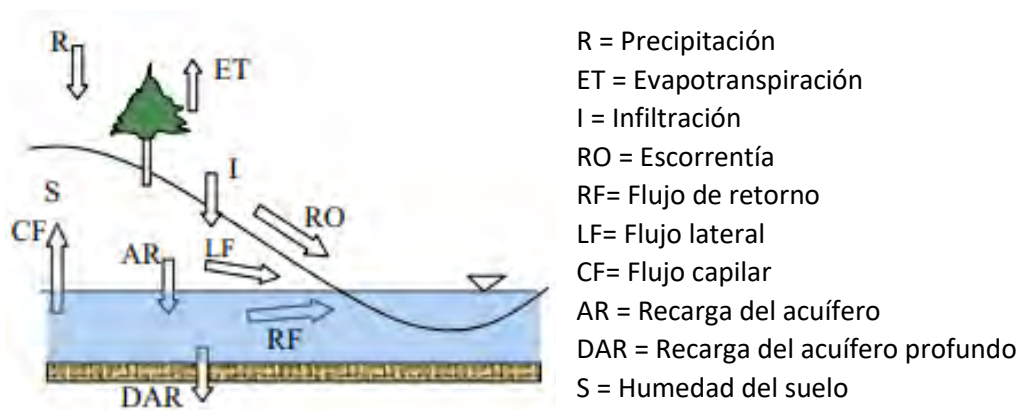
Nota. Reproducido de Musy, 2021.

2.1.2 Balance hídrico

Cuantificación de los parámetros envueltos en el ciclo hidrológico, como de los consumos de agua en un área determinada (cuenca), y las interrelaciones entre ellos, dando

como resultado un diagnóstico de condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área. Dado que el balance hídrico presenta un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en un área en particular, permite tomar medidas y establecer lineamientos y estrategias para su protección y utilización de una manera integrada, de tal forma que se garantice su disponibilidad tanto en cantidad como en calidad.

Figura 2.
Esquema conceptual del balance hídrico en el modelo SWAT



Nota. Reproducido de Abbaspour et al., 2015.

2.1.3 Caudal

Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal del río o canal en una unidad de tiempo.

2.1.4 Escorrentía

Agua de las precipitaciones que escurre superficialmente que no es evaporada ni infiltrada. Se clasifica en directa: que llega directamente a los cauces superficiales en un periodo corto de tiempo después de la precipitación, y que engloba la escorrentía superficial y

la subsuperficial (agua que tras un corto recorrido lateral brota a la superficie sin llegar a la zona freática); y basal: que es la que alimenta a los flujos superficiales en época de estiaje.

2.1.5 Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es una unidad territorial en la cual la precipitación se reúne y escurre a un punto de captación o que fluye toda al mismo río, lago o mar. En esta área conviven los seres humanos, animales y plantas, todos ellos relacionados.

2.1.6 Subcuenca

Unidad de drenaje de menor superficie que una cuenca y que forma parte de esta, constituyendo un tributario de esta, es decir, una cuenca que sale o que drena a una cuenca más grande.

2.1.7 Erosión y erosión hídrica

La erosión es un proceso de acarreo del suelo por acción del agua o viento; o como un proceso de desprendimiento y acarreo acelerado de las partículas del suelo causado por el agua y el viento.

Según el CIREN (2010) las categorías de erosión son: Nula (sin signos de pérdida de suelo), ligera (suelo levemente alterado en el espesor), moderada (suelo con clara presencia del subsuelo en al menos 30%), severa (presencia ocasional de surcos y cárcavas), muy severa (suelo no apropiado para el cultivo, destruido en más de un 60% en la superficie) y no aparente (sectores de suelo protegido por cubierta vegetal densa -mayor a 75%- o buenas prácticas de juego).

Los costos sociales y económicos de la erosión son complejos de calcular, por un lado, se deben considerar las pérdidas de cosecha por reducción de la superficie de suelo cultivable o de su productividad, también considerar que es la capa del suelo superficial la que se erosiona primero y esta, generalmente la más fértil, por lo que el daño económico es importante, aunque el espesor de pérdida sea pequeño. Otros daños son la contaminación de agua, colmatación de embalses, incremento de riesgo de inundación y la pérdida de biodiversidad.

La erosión hídrica es el proceso cuyo agente principal y más violento desde el punto de vista de arranque y transporte de material es el agua; cuando esta se acumula artificialmente en la superficie y además la erosión provocada por el impacto de las gotas sobre el suelo desnudo, y cuando la acción hidráulica arranca y transporta las partículas del suelo por el escurrimiento en laderas y taludes. Tipos de erosión hídrica: por salpicaduras y por flujo superficial (laminar, surcos y cárcavas).

Tabla 1.

Clasificación de la degradación de suelos causados por erosión hídrica

CATEGORÍA	PÉRDIDA DE SUELO	
	Ton/Ha/año	Mm/año
Ninguna a ligera	< 10	< 0.6
Moderada	10 – 50	0.6 – 3.3
Alta	50 – 200	3.3 – 13.3
Muy Alta	> 200	> 13.3

Nota. Reproducido de FAO, 1980.

Diversos modelos han sido desarrollados para estimar la generación de erosión hídrica como el empírico (1994), SLEMSA – Elwell (1978), ecuación USLE (Wischmeier y Smith; 1965, 1978) y la ecuación modificada y revisada de USLE (MUSLE y USLE respectivamente).

2.1.8 Sedimentos

Detrito rocoso resultante de la erosión, que es depositado cuando disminuye la energía del fluido que lo transporta. Las características de los sedimentos dependen de la composición de la roca erosionada, del agente de transporte, de la duración del transporte y de las condiciones físicas de la cuenca de sedimentación. Cuando la energía del agente responsable (principalmente gravedad) del transporte se reduce, las partículas son depositadas produciendo sedimentación.

Tipos de sedimento: El movimiento de los sedimentos en las corrientes y ríos presenta dos formas: Suspensión que están constituidos por partículas más finas mantenidas en suspensión por remolinos de la corriente y sólo se asientan cuando la velocidad de la corriente se reduce, o cuando el lecho se hace más liso, o la corriente descarga en un pozo o lago; y Las partículas sólidas de mayor tamaño que son arrastradas a lo largo del lecho de la corriente (arrastre de fondo). Existe un tipo intermedio de movimiento en el que las partículas se mueven aguas abajo dando rebotes o saltos tocando el fondo o en suspensión hasta que vuelven a caer al fondo (saltación) (Hudson, 1997).

Se denomina relación de distribución a la proporción de sedimento que llega a la corriente en comparación con el movimiento bruto de los sedimentos dentro de la cuenca. Esta puede ser apenas de 1% si existen depresiones o zonas con una espesa vegetación en las que se retiene la mayor parte del suelo.

Una segunda causa posible de error es el factor tiempo. En una cuenca hidrográfica mayor el sedimento puede erosionarse y depositarse y sucesivamente volverse a erosionar y volverse a depositar cierto número de veces antes de que el sedimento llegue a la corriente. Una muestra de este sedimento podría incluir material erosionado en su origen de varios años antes.

2.1.9 Modelamiento hidrológico

Se define como un sistema matemático o físico que obedece a ciertas condiciones específicas y cuyo comportamiento es utilizado para entender un sistema físico, biológico o social. Representación abreviada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática.

Los modelos hidrológicos constituyen hoy día una de las herramientas más útiles en la planificación de recursos hídricos. El rápido desarrollo de la industria de la computación ha hecho posible que los microcomputadores sean cada vez más accesibles y con mayor capacidad para manejar programas complejos y voluminosas bases de datos en menor tiempo que lo que era posible en los años sesenta cuando se iniciaron los primeros modelos digitales.

En la actualidad existen varios modelos hidrológicos, la importancia de estos radica en que, una vez calibrados o validados, pueden ser utilizados para simular diversas situaciones o para extender la información existente. Un modelo no nos da soluciones, sino aproximaciones a ciertos cambios o toma de decisiones a nivel de cuencas hidrográficas. Con la simplificación de la realidad (modelo hidrológico) se puede aprender la relación causa-efecto de una cuenca por medio de los datos de entrada y salida con lo cual se obtiene un entendimiento de los procesos físicos hidrológicos dentro de una cuenca.

2.1.10 Simulación hidrológica

La simulación hidrológica intenta reproducir con la ayuda de un software y utilizando un modelo matemático, todos los procesos físicos que conforman el ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica.

Los datos arrojados por la simulación deben ser interpretados de manera que los tomadores de decisiones puedan planificar de mejor manera en base a la información que se les proporciona.

En manejo de cuencas tienen gran utilidad ya que se puede simular la respuesta de la cuenca ante cambios en el uso de la tierra, cambio climático y prácticas de conservación de suelos dentro de las cuencas.

La simulación imita a la realidad y la modelación crea un patrón de la realidad y en ambos casos podemos usar softwares o modelos manuales según sea el caso de complejidad, esa sería la diferencia entre ambos.

2.1.11 Alternativas de solución para la conservación del suelo

Es aplicar prácticas o técnicas que contribuyen a conservar las características físicas, químicas y microbiológicas del suelo, para mantener sus capacidades productivas. Con estas técnicas de conservación de suelos se disminuye o elimina el arrastre y pérdida de este por acción de la lluvia y/o viento, se mantiene o se aumenta su fertilidad y por ende la buena producción de cultivos.

Existen muchas prácticas o técnicas de conservación de suelos que son sencillas, de bajo coste, de fácil aplicación (algunos con pocos conocimientos previos para su ejecución) y de aceptación de agricultores, entre ellas tenemos:

- Siembra de plantas de cobertura y abonos verdes
- Uso de estiércol y abonos orgánicos
- Terrazas individuales
- Barreras o muros de piedra
- Barreras vivas
- Siembra en curvas de nivel o siembra al contorno

- Sistemas agroforestales
- Labranza conservacionista o mínima
- Zanjas de ladera (de alto costo, pero mayor eficiencia)
- Terrazas angostas (de alto costo, pero mayor eficiencia)
- Terrazas de banco (de alto costo, pero mayor eficiencia)

2.1.12 Sistema de Información Geográfica (SIG)

Es un sistema de gestión de datos específicamente diseñado para el proceso simultáneo de datos y de los atributos y de los relativos a ellos.

También se le define como un sistema de soporte para la toma de decisiones que involucra la integración de datos referenciales especialmente.

Cabe mencionar que en muchas bibliografías se usa el término original en inglés de “GIS” (*Geographic Information System*); en tiempos recientes el mercado peruano está prefiriendo el término original en inglés de “GIS” para poder diferenciarlo de SIG (Sistema Integrado de Gestión).

2.1.13 Unidades de respuestas hidrológicas (URH)

Zonas de unidad mínima de trabajo de los modelos hidrológicos distribuidos. Estas zonas compartirán el mismo suelo, cobertura vegetal y rango de pendiente. Por lo que su comportamiento hidrológico (percolación, evapotranspiración, escurrimiento, entre otros) de estas zonas a lo largo de la cuenca serán similares ya que comparten las mismas características.

Cabe mencionar que la interfaz ArcSWAT del modelo SWAT usa el término original en inglés de “HRU” (*Hydrological Response Units*) así como también algunas bibliografías principalmente las escritas en inglés.

2.1.14 Modelo Digital de Elevación (DEM)

Un modelo digital de elevación es la representación visual y matemática de los valores de altitud con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar el relieve y los elementos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo Ráster el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

2.1.15 Uso del suelo o cobertura vegetal (Land use)

Clasificación del territorio de acuerdo con su dimensión funcional o su dedicación socioeconómica actual, como por ejemplo uso industrial, comercial, recreativo, agricultura, etc. Es el uso humano del suelo.

“Uso del suelo” se distingue de “cobertura del suelo” en que este último describe la actual cobertura superficial del terreno; el uso del suelo puede ser militar, pero la cobertura puede ser matorral (Open Street Map Org, 2020).

El modelo SWAT maneja su propia clasificación de cobertura vegetal, la reclasificación al código de la base de datos de SWAT se puede hacer desde la interfaz ArcSWAT una vez cargado el mapa de cobertura vegetal en el entorno SIG (Sistema de Información Geográfica). Las categorías y códigos SWAT de cobertura vegetal son mostrados a continuación.

Tabla 2.
Códigos SWAT de cobertura vegetal

NOMBRE	CÓDIGO SWAT	TIPO DE PLANTA
Tierra agrícola general/cereales	AGRL	Estación cálida
Tierra agrícola cultivo en hileras	AGRR	Estación cálida

Tierra agrícola cul. crecimiento corto	AGRC	Estación templada
Huerto/Planifolio	ORCD	Árboles
Heno	HAY	Perenne
Bosque mixto	FRST	Árboles
Bosque caducifolio	FRSD	Árboles
Bosque perennifolio	FRSE	Árboles
Humedal	WETL	Perenne
Humedal boscoso	WETF	Árboles
Humedal no boscoso	WETN	Perenne
Césped/Pasto	PAST	Perenne
Pasto de verano	SPAS	Perenne
Pasto de invierno	WPAS	Perenne
Grass	RNGE	Perenne
Arbusto/matorral	RNGB	Perenne
Escasa/estéril vegetación	SWRN	Perenne
Asentamiento humano y construcción (densidad media)	URMD	No aplica
Agua, nieve y hielo	WATR	No aplica

Nota. Reproducido de Arnold et al., 2012.

2.1.16 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Indicador gráfico que se utiliza para analizar mediciones en teledetección, a menudo desde una plataforma espacial, evaluando si el objetivo que se observa contiene o no vegetación verde viva.

El índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI, fue uno de los intentos más exitosos de identificar de forma sencilla y rápida las áreas vegetadas y su "condición", y sigue siendo el índice más conocido y utilizado para detectar las marquesinas de plantas verdes vivas en datos multiespectrales de teledetección. Una vez demostrada la viabilidad de detectar la vegetación, los usuarios tendían a utilizar también el NDVI para cuantificar la capacidad fotosintética de las marquesinas vegetales. Sin embargo, esto puede ser una tarea bastante más compleja si no se hace correctamente.

El índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI, se calcula de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{IRCercano-ROJO}{IRCercano+ROJO} \quad (1)$$

Además del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), también existen otros índices de vegetación que funcionan también como estimadores de de tipos de cobertura vegetal. Entre ellos se encuentran el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) y el Índice de Estrés Hídrico (MSI).

2.1.17 Suelos (*Soil type*)

Categorización de tierras basada en características distintivas y en criterios de uso. Entre los distintos tipos de suelos tenemos los arenosos, los limosos y los arcillosos. Según el suelo se podrían plantar algunos cultivos u otros, además hay suelos más vulnerables a la sequía o contaminación. Las propiedades físicas-químicas del suelo son importantes para el ecosistema.

La interfaz ArcSWAT del modelo SWAT ofrece dos clasificaciones preinstaladas de tipos de suelos: SSURGO y STATSGO (Estados Unidos); una de instalación opcional: FAO/UNESCO *Soil Map of the World* (internacional); y además es posible hacer una propia clasificación de suelos local, aunque su realización es compleja.

Tabla 3.

Códigos SWAT de los parámetros de los componentes del suelo

PARÁMETRO	CÓDIGO SWAT	UNIDAD
Nombre	SNAM	Alfanumérico
Número de capas	NLAYERS	Adimensional – De 1 a 10
Grupo hidrológico	HYDGRP	Adimensional – A, B, C o D
Profundidad máxima de enraizamiento en el perfil	SOL_ZMX	mm – De 0 a 3500
Fracción de porosidad	ANION_EXCL	Adimensional – De 0.01 a 1
Volumen máximo de ruptura del perfil	SOL_CRK	m ³ /m ³ – De 0 a 1
Textura (opcional)	TEXTURE	Alfabético
Profundidad de cada capa	SOL_Z	mm – De 0 a 3500

Densidad aparente de cada capa	SOL_BD	gr/cm ³ – De 0.9 a 2.5
Capacidad de agua disponible para las plantas de cada capa	SOL_AWC	mm/mm – De 0 a 1
Contenido de carbono orgánico de cada capa	SOL_CBN	% peso – De 0.05 a 10
Conductividad hidráulica saturada por capa	SOL_K	mm/hr – De 0 a 2000
Contenido de arcilla de cada capa	CLAY	% peso – De 0 a 100
Contenido de limo de cada capa	SILT	% peso – De 0 a 100
Contenido de arena de cada capa	SAND	% peso – De 0 a 100
Contenido de fragmento de roca de cada capa	ROCK	% peso – De 0 a 100
Albedo de cada capa	SOL_ALB	Adimensional – De 0 a 0.25
Factor k de erodabilidad de usle de cada capa	USLE_K	Adimensional – De 0 a 0.65
Conductividad eléctrica de cada capa	SOL_EC	dS/m – De 0 a 100
Contenido de carbonato calcio de cada capa	SOL_CAL	% – De 0 a 65
Ph	SOL_PH	Adimensional – De a 10

2.1.18 Producto grillado PISCO

Información espacial interpolada obtenida con información real de campo de estaciones meteorológicas y Ráster climáticos obtenidos por satélites. Este producto permite obtener precipitación, temperatura máxima y mínima muy precisa de un lugar dado en el Perú. En la presente investigación se ha usado la versión 2 del producto que arroja información climática del 1ro de enero de 1981 al 31 de diciembre del 2016. Para el medio peruano esto permite aplicar modelos hidrológicos en cuencas con poca información meteorológica histórica.

2.1.19 Motor climático CFSR

El Reanálisis del Sistema de Pronóstico Climático (*Climate Forecast System Reanalysis* - CFSR) del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) se completó durante el período de 36 años de 1979 a 2014. El CFSR fue diseñado y ejecutado como un sistema global, de alta resolución, acoplado de atmósfera-océano-tierra superficie-mar y hielo para proporcionar la mejor estimación del estado de estos dominios acoplados durante este período. El CFSR se extenderá como un producto operativo y en tiempo real en el futuro.

El motor climático CFSR ofrece datos diarios de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar en formato SWAT para una ubicación y tiempo determinados.

El motor climático CFSR ofrece información meteorológica estimada de variables poco medidas en el Perú como velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar permitiendo correr el modelo en cuencas con poca información meteorológica histórica. Siempre se recomienda ingresar a un modelo ambiental información real de campo y solo cuando no se cuente con ello recién hacer uso de estimaciones o resultados de otros modelos. Para la presente investigación se ha utilizado los resultados de PISCO (corroborados con información real de campo) en las variables de precipitación, temperatura máxima y mínima, y resultados del motor climático CFSR en las demás.

2.1.20 Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) e interfaz ArcSWAT

SWAT fue desarrollado por el Servicio de Investigación en Agricultura (ARS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) y la Universidad de Texas para evaluar el impacto del cambio de cobertura vegetal en las cuencas hidrográficas. La herramienta modela el volumen y calidad del agua a nivel diario, el cual puede ser usado para la evaluación de servicios ecosistémicos (beneficios de la naturaleza que provee al hombre) como el agua que dispondría un municipio, industria y agricultores, flujo del río que soportaría pesca y recreación, riesgo de inundación y otros estudios en infraestructura hídrica. SWAT es un modelo continuo diario que pretende estudiar el fenómeno en un ciclo largo en el tiempo y no en una sola época como las inundaciones por una tormenta. SWAT acepta una variedad de datos de entrada, pero la entrada de esos datos variará de las necesidades específicas del análisis. El modelo SWAT se diseñó para ser aplicado en cuencas desde cientos de hectáreas a miles de kilómetros cuadrados y ha sido utilizado alrededor del mundo (Srinivasan y Arnold

,1994; Spruill et al., 2000; Chanasyk et al., 2003, Chu y Shirmohammadi, 2004; Narasimhan y Col., 2005; Wu y Johnston, 2007; Schuol et al., 2008; Du et al., 2009; Rossi et al., 2009), con fines de valorar el efecto del uso y manejo de la tierra sobre calidad y régimen de las producciones de agua y sedimentos.

SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en una cuenca. Para el modelamiento, la cuenca se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud y eficiencia de los cálculos. Adicionalmente SWAT trabaja por URH (Unidades de Respuesta Hidrológica) obtenidas del empalme de tipos de suelo con pendientes del terreno y coberturas presentes.

SWAT está definido por 8 componentes: hidrología, clima, erosión, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de las plantas, nutrientes, pesticidas y manejo del suelo. El presente estudio se enfoca en los componentes de hidrología, clima y erosión y sedimentación. El ciclo hidrológico que simula SWAT se basa en la ecuación de contenido final de agua en el suelo.

Ecuación del modelo SWAT

$$SW_t = SW_0 + \sum_i^t (R - Q_s - ET - w - Q_g) \quad (2)$$

Nota. Reproducido de Neitsch et al., 2005; Miller et al., 2007.

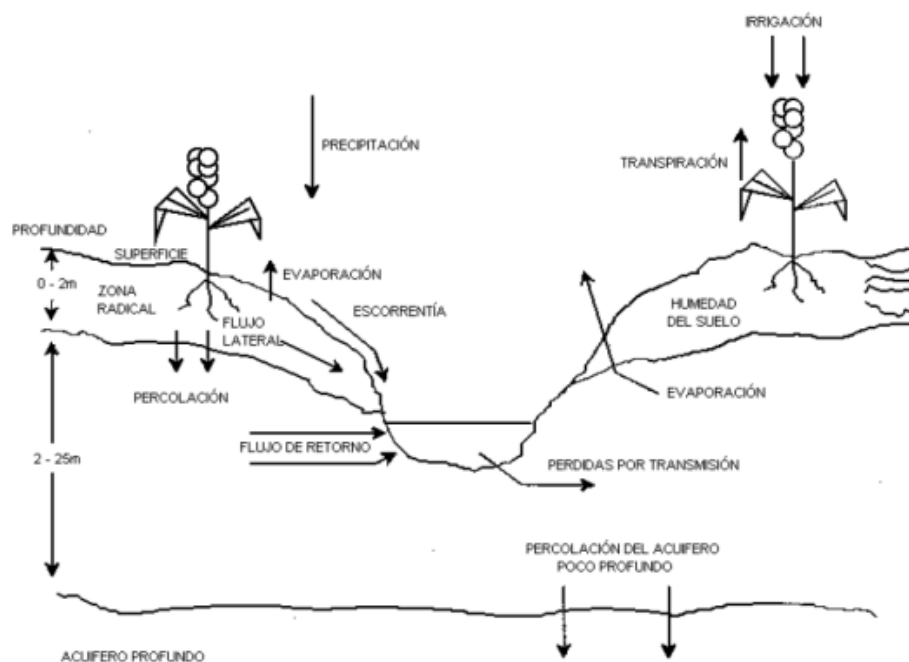
Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm) en el tiempo t , SW_0 es el contenido inicial de agua en el suelo en el día i (mm), t es tiempo (días), R es la precipitación diaria (mm), Q_s es la cantidad de escorrentía superficial en un día i (mm), ET es la cantidad evapotranspiración en día i (mm), w es la infiltración del agua a la zona no saturada del perfil del suelo en un día i (mm), y Q_g es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm).

Entre las variables de entrada del modelo se encuentran el suelo (soil type), cobertura vegetal o uso de suelo (land use) y el modelo digital de elevaciones (DEM) siendo todos estos obligatorios. Además, son necesarios datos climáticos como precipitación, temperaturas

máximas, temperatura mínima, radiación solar y velocidad del viento todos a nivel diario, siendo opcionales ya que si no son introducidos el sistema los genera automáticamente, siendo recomendado siempre introducir valores reales por no ser siempre precisos los generados.

Las salidas del modelo SWAT son extensas. El modelo provee resultados por subcuencas o URH y por tiempo además de un resumen mensual o anual (según se especifique) y una media total de todo el periodo de simulación. Los datos de salida del modelo describen el movimiento del agua a través del ciclo hidrológico, desde la evapotranspiración hasta la escorrentía. El modelo también describe el movimiento de nutrientes y pesticidas en la cuenca si el usuario lo especifica e ingresa los datos necesarios.

Figura 3.
Representación hidrológica del modelo SWAT



Nota. Reproducido de Uribe, 2010.

SWAT ha sido aplicado a lo ancho de EEUU y alrededor del mundo, con cientos de publicaciones; los usuarios de este modelo en Estados Unidos incluyen, pero no están limitados

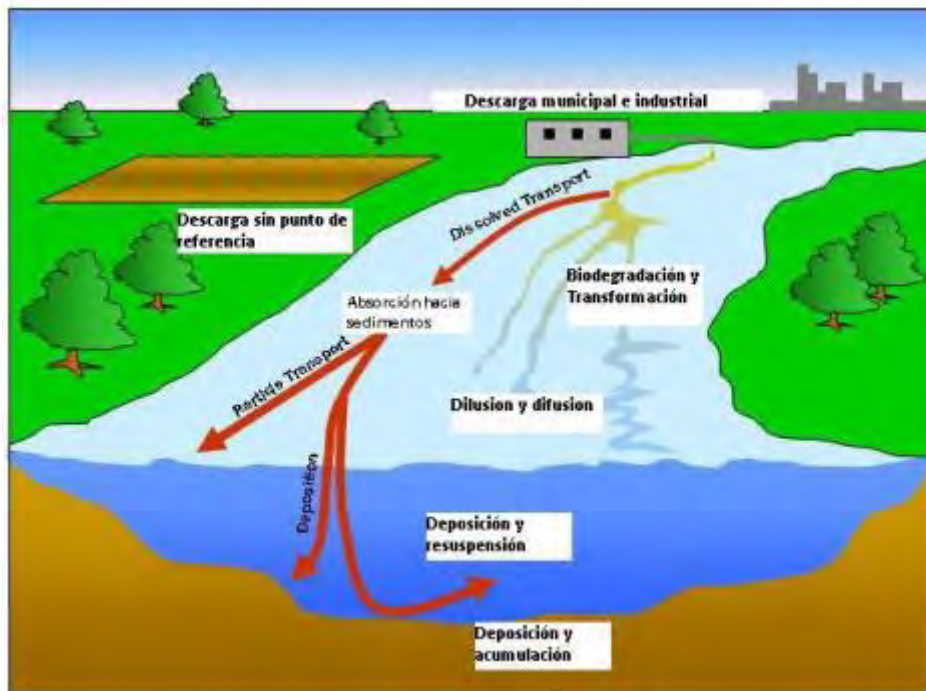
a, Natural Resources Conservation Service, Environmental Protection Agency (EPA), Texas River Authority, National Oceanic and Atmospheric Administration, Bureau of Indian Affairs, United States Department of Agriculture y muchas de las universidades de dicho país. Las aplicaciones incluyen la evaluación hidrológica e impactos de contaminantes debido al uso del agua y manejo de tierra. También ha sido analizado en las fuentes de contaminantes y acciones necesarias para encontrar la carga diaria máxima total (TMDL), cuantificar el impacto del cambio climático, estimación de la erosión del suelo, evaluar potencial hidroeléctrico y evaluar las mejores prácticas de manejo. A pesar de la versatilidad del modelo, ejecutarlo requiere datos precisos que el usuario no necesariamente podrá conseguir fácilmente. También está la complicación que el usuario tendrá que aprender a configurar el modelo si es que no tiene experiencia anterior con el modelo SWAT o algunas de sus interfaces.

Una vez que SWAT determina las cargas de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas hacia el flujo principal, las cargas son dirigidas por la red de corriente de la cuenca usando una estructura de orden semejante a la HYMO. Adicionalmente al seguimiento del flujo en el canal, SWAT modela también la transformación de sustancias químicas en la corriente y cauce.

El modelo SWAT trabaja bajo un entorno SIG (Sistema de Información Geográfica) el cual nos ayuda a organizar espacialmente la información meteorológica, hidrológica y la fisiográfica como la cobertura vegetal, suelo, elevación, cursos de agua, pendiente, entre otros.

Figura 4.

Procesos de corriente modelado por SWAT



Nota. Reproducido de Neitsch et al., 2005.

Mientras SWAT es el modelo en sí, ArcSWAT es la interfaz. En este sentido ArcSWAT ayuda a preparar e ingresar toda la información que el modelo SWAT exige como la climatología y fisiografía de la cuenca bajo un entorno SIG más amigable. Es posible trabajar directamente con el modelo descartando usar alguna interfaz, pero hacerlo de esa manera sería una rutina muy larga y engorrosa, en efecto ArcSWAT facilita al usuario la entrada y lectura de información al modelo. La interfaz ArcSWAT no es la única en el mercado, esta interfaz corre bajo el entorno SIG más utilizado en el país (ESRI ArcGIS), pero también existen otras para los diversos softwares SIG que se encuentran en el medio nacional e internacional como AVSWAT (ArcView), QSWAT (QGIS) y MWSWAT (MapWindow).

También se han ido desarrollando diferentes herramientas para dar soporte al modelo SWAT desde que apareció la primera versión como SWAT-CUP para la calibración del modelo, VIZSWAT para realizar animaciones, visualizaciones y análisis de los datos que el modelo arroja, SWAT CHECK que ayuda a identificar potenciales problemas del modelo,

SWAT INPUT CHECKER PROGRAM que asiste al usuario en identificar los datos de entrada del modelo que puedan estar dando resultados irrazonables, entre otros.

Algunas de las características del modelo SWAT que lo destacan sobre otros modelos hidrológicos de simulación semi distribuidos son:

- Es un modelo a escala de cuenca y subcuencas desarrollado para cuantificar el impacto de las prácticas para la gestión del territorio en cuencas grandes y complejas como las del presente estudio.
- El modelo se basa en parámetros que están disponibles en su propia base de datos, pero permite adaptarlo a las condiciones reales de la cuenca de estudio, lo que indica su gran flexibilidad al modelo. Por lo que es muy útil en cuencas que no se disponga mucha información.
- La realización de cálculos y procesos de computación pueden ser llevados a cabo por PCs y laptops, es decir, equipos informáticos habituales, es decir, no se necesita de supercomputadoras y cualquier estudiante o investigador lo puede realizar en su computadora personal.
- SWAT permite simular procesos interactivos y de diferentes tipos de manejo.

2.1.21 Ecuación MUSLE (Ecuación universal de pérdida de suelo modificada)

El modelo SWAT estima la producción de erosión y sedimento para cada URH con la ecuación universal de pérdida de suelo modificada (MUSLE) desarrollada por Williams y Berndt (1977). MUSLE es una versión modificada de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) desarrollada por Wischmeier y Smith (1965, 1978). Mientras USLE utiliza la precipitación como indicador de energía erosiva, MUSLE utiliza la escorrentía para simular la producción de erosión y sedimento, y mientras USLE hace la estimación promediada de las

pérdidas anuales de suelos a largo plazo, MUSLE calcula el aporte de sedimento para un evento singular.

Ecuación MUSLE

$$\text{Sed} = 11.8 \cdot (Q_{\text{surf}} \cdot q_{\text{peak}} \cdot \text{Area}_{\text{urh}})^{0.56} \cdot K_{\text{usle}} \cdot C_{\text{usle}} \cdot P_{\text{usle}} \cdot \text{LS}_{\text{usle}} \cdot \text{CFRG} \quad (3)$$

Nota. Reproducido de Uribe, 2010.

Dónde:

- sed: Producción sedimentos en un día dado (Ton)
- Q_{surf} : Volumen de escorrentía superficial (mm/Ha)
- q_{peak} : Escorrentía máxima (m3/seg)
- Area_{urh} : Área del URH (Ha)
- K_{usle} : Factor de erodabilidad del suelo ($0.013 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr} / (\text{m}^3 - \text{Ton} \cdot \text{cm})$)
- C_{usle} : Factor de cobertura vegetal y gestión de USLE (adimensional)
- P_{usle} : Factor de prácticas de conservación y manejo de cultivos de USLE (adimensional)
- LS_{usle} : Factor topográfico de USLE (adimensional)
- CFRG: Factor fragmento macro calculado a partir del porcentaje de piedra en la primera capa de suelo (adimensional)

La sustitución tiene como resultado varios beneficios: la precisión de predicción del modelo se incrementa, la necesidad para una proporción de entrega se elimina, y una sola tormenta de producción de sedimento pueden ser calculadas. SWAT en la parte de la hidrología suministra estimaciones de volumen de escorrentía y una tasa máxima de escorrentía que con

el área de la subcuenca se utiliza para calcular la energía variable erosiva de escorrentía. El factor de manejo de cosecha se calcula nuevamente cada día que la escorrentía ocurre. Es una función de la biomasa en la superficie, del residuo del suelo en la superficie, y el factor C mínimo para las plantas. Otros factores de la ecuación de erosión son evaluados como los descritos por Wischmeier y Smith (1978).

2.1.22 Correlaciones: R2, Nash–Sutcliffe y PBIAS

La correlación es una medida de la relación lineal (covariación) entre dos variables cuantitativas continuas (x, y). La forma más fácil de saber si dos variables están correlacionadas es determinar si van a variar (varían juntas). Es importante tener en cuenta que esta covariación no implica necesariamente causalidad, la correlación puede ser casual.

En los modelos informáticos se usa el concepto de correlaciones para comparar los resultados de un modelo con la realidad, ambos deben de ser similares; usualmente los registros son inmensos como para una comparación visual y también se necesita una medida de comparación exacta (numérica) entre las varias corridas del modelo. Las funciones de correlación permiten comparar entre las variables y mostrar las que más se parecen (correlacionan).

Nash–Sutcliffe (NSE)

El coeficiente de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe se utiliza para evaluar la potencia predictiva de los modelos. Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}$$

Donde Q_0 es la media de las descargas observadas, y Q_m se modela la descarga. Q_0^t se observa la descarga en el momento t .

La eficiencia de Nash-Sutcliffe puede variar de $-\infty$ a 1. Una eficiencia de 1 ($E = 1$) corresponde a una coincidencia perfecta de descarga modelada con los datos observados. Una eficiencia de 0 ($E = 0$) enseña que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos vistos, mientras que una eficiencia menor que cero ($E < 0$) se produce cuando la media observada es un mejor predictor que el modelo o, en otras palabras, cuando la varianza residual (descrita por el numerador en la expresión anterior), es mayor que la varianza de datos (descrita por el denominador). Esencialmente, cuanto más cerca esté la eficiencia del modelo de 1, más preciso será el modelo. En el caso del modelo SWAT se espera una correlación de los resultados con los registros históricos de al menos 0.5.

Coefficiente de determinación (R^2)

En la estadística, el coeficiente de determinación, expresado R^2 o r^2 y pronunciado "R al cuadrado", es la proporción de la varianza en la variable dependiente que es predecible a partir de las variables independientes.

Es una estadística utilizada en el contexto de modelos estadísticos cuyo objetivo primordial es la predicción de resultados futuros o la prueba de hipótesis, sobre la base de otra información relacionada. Esta proporciona una medida de cómo los resultados bien observados son replicados por el modelo, basado en la proporción de variación total de los resultados explicados por el modelo. En el caso del modelo SWAT se espera una correlación de los resultados con los registros históricos de al menos 0.5.

Sesgo porcentual (PBIAS)

Medidas de sesgo porcentual (PBIAS) la tendencia media de los datos simulados a ser más grandes o pequeños que sus homólogos observados.

El valor óptimo de PBIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican una simulación precisa del modelo. Los valores positivos indican sesgo de subestimación del modelo y los negativos indican sobreestimación del modelo. PBIAS se calcula con la siguiente ecuación:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i^{obs} - A_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (A_i^{obs})}$$

donde PBIAS es la desviación de los datos que se evalúan, expresada como un porcentaje.

Porcentaje de error de volumen de flujo, error de predicción y la desviación porcentual del volumen de flujo de flujo (D_v) se calculan de una manera similar a PBIAS. El término de desviación (D_v) se utiliza para evaluar la acumulación de diferencias en el volumen de flujo de flujo entre datos simulados y medidos para un período de análisis determinado.

PBIAS fue seleccionado por recomendación por varias razones: D_v fue recomendado por ASCE (1993), (2) D_v se utiliza comúnmente para cuantificar los errores de equilibrio de agua y su uso se puede extender fácilmente a errores de carga, y (3) PBIAS tiene la capacidad de indicar claramente un rendimiento deficiente del modelo. Los valores de PBIAS para el flujo (caudal) tienden a variar más, entre diferentes métodos de auto calibración, durante los años secos que durante los años húmedos. Este hecho debe tenerse en cuenta al intentar realizar una evaluación de muestra dividida, una para la calibración y otra para la validación. En el caso del modelo SWAT se espera una correlación de los resultados con los registros históricos de al menos +/-25%.

2.1.23 Calibración de modelos hidrológicos

La calibración es el proceso por el que se identifican los valores numéricos de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulados se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados.

Las calibraciones de los modelos SWAT son usualmente llevadas en programas informáticos, aunque también podrían ser llevados manualmente, el más usado en el medio es “SWAT-CUP” desarrollado por el instituto independiente suizo 2w2e. SWAT-Cup cuenta con los siguientes algoritmos: SUFI2, GLUE, ParaSol y MCMC. La presente investigación utiliza el algoritmo SUFI2 por presentar los mejores resultados en varias investigaciones publicadas.

2.1.24 Marco Legal

En el capítulo 2 de la actual Constitución Política del Perú (1993) se establece que el Estado Peruano garantiza el derecho de las personas a un ambiente adecuado y suficiente para el correcto desarrollo de sus vidas, constituyéndose en el encargado de velar por el uso racional de los recursos naturales que son considerados como parte del patrimonio natural de la nación (Rojas, 2012)

Por otro lado, la Ley N° 29338 Ley general de recursos hídricos y su reglamento incorpora el enfoque integrado de cuencas hidrográficas y la implementación de un Sistema Nacional de gestión de recursos hídricos conformado por Consejos de Cuencas y Subcuencas, además de la creación de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) como órgano adscrito al Ministerio de Agricultura (MINAGRI).

III: MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

De acuerdo con Hernández et. al (2014) el método es un proceso riguroso para lograr la adquisición de conocimientos teórico-práctico. En tal sentido se detalla a continuación los procedimientos para desarrollar la presente investigación abarcando los siguientes métodos, tipos, niveles y diseño.

Método de la investigación científica: Empírico, inductivo y deductivo; por estar basado en experimentación u observación (evidencias verificadas en campo), y además se pone a prueba una hipótesis.

Diseño: No experimental por analizar las variables sin manipularlas deliberadamente, es decir, no se varían las variables independientes y solo se observan los fenómenos como tal y como se dan en su contexto natural y luego analizarlos. No experimental Longitudinal o evolutiva por analizar cambios a través del tiempo, recolectar datos en diferentes momentos o periodos y analizar la variación.

Tipo: Análisis evolutivo de grupos (cohorte) por analizar cambios a través del tiempo (2016 – 2030) en subpoblaciones o grupos específicos por una característica en común (subcuencas y URH).

Niveles: Correlacional, por analizar la relación entre los diferentes factores que originan el problema (generación de sedimentos) y la influencia de estos (donde y porque se generan más). Descriptivo, Por describir un fenómeno (generación de sedimentos) mediante un estudio en una circunstancia temporal – espacial dada.

3.2 Ámbito temporal y espacial

El ámbito temporal del estudio comprende desde el año 2016 hasta el año 2030 por ser la franja de tiempo de los resultados de la investigación.

El ámbito espacial (área de estudio) comprende la cuenca alta del río Rímac ubicada en el flanco occidental de la cordillera de los andes; políticamente en la Región Lima provincias, Provincia de Huarochirí y los distritos de San Mateo y Chicla; geoespacialmente en los límites WGS84 18S 8722541 Norte, 8681003 Sur, 354289 Oeste y 385639 Este, con centroide en las coordenadas 367090 Este y 8699550 Norte.

3.3 Variables

3.3.1 Variables dependientes e independientes del objetivo general

(Aplicar el modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Rímac para estimar cuantitativa y espacialmente la generación de caudales y sedimentos medios)

Tabla 4.

Variables del objetivo general

VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Estimación cuantitativa y espacial de la generación de caudales y sedimentos medios	Aplicación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Rímac	Climatología de la cuenca como la precipitación, temperatura, entre otros.	Registros numéricos	Mapas e informes climáticos
		Geografía física de la cuenca como suelo, cobertura vegetal, entre otros	Imagen ráster	Mapas e informes geográficos

3.3.2 Variables dependientes e independientes del primer objetivo específico

(Validar la estimación cuantitativa y espacial de la generación de caudales y sedimentos medios obtenidos en la aplicación del modelo hidrológico SWAT)

Tabla 5.

Variables del primer objetivo específico

VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIÓN	INDICADORES	INSTRUMENTOS
	Precipitación	Meteorológica	mm	

Validación de la estimación cuantitativa y espacial de caudales y sedimentos medios del modelo	Temperatura máxima y mínima		°C	Registros de estaciones meteorológicas
	Velocidad del viento		km/día	
	Humedad relativa		%	
	Radiación		Mj/m ²	
	Elevación		msnm	Mapas e informes geográficos
	Suelos	Física	Adimensional	
	Cobertura vegetal		Adimensional	
Caudales medios	Hídrica	m ³ /s	Aforos de estaciones hidrométricas	

3.3.3 Variables dependientes e independientes del segundo objetivo específico

(Estimar como influye el actual escenario climático y de cobertura vegetal en la generación de caudales y sedimentos medios)

Tabla 6.

Variables del segundo objetivo específico

VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIÓN	INDICADOR	INSTRUMENTO
Estimación de generación de caudales y sedimentos medios	Actual escenario climático y de cobertura vegetal	Adimensional	Registros numéricos e imagen ráster	Mapas e informes

3.3.4 Variables dependientes e independientes del tercer objetivo específico

(Evaluar cómo influye un futuro escenario climático y de cobertura vegetal en la generación de caudales y sedimentos medios)

Tabla 7.

Variables del tercer objetivo específico

VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIÓN	INDICADOR	INSTRUMENTO
----------------------	------------------------	-----------	-----------	-------------

Evaluación de generación de caudales y sedimentos medios	Futuro escenario climático y de cobertura vegetal	Adimensional	Registros numéricos e imagen ráster	Mapas e informes
--	---	--------------	-------------------------------------	------------------

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

La población es la cuenca del río Rímac.

3.4.2 Muestra

La muestra es la cuenca alta del río Rímac elegido mediante un método no aleatorio por ser el principal aportante de caudales y sedimentos de la cuenta y por ende de la principal fuente de agua dulce de la capital peruana.

3.5 Instrumentos

Todos los siguientes instrumentos han sido seleccionados por ser publicados por instituciones de renombre y ser citados en innumerables publicaciones.

3.5.1 Materiales

Información cartográfica

- Carta Nacional Matucana (24k) a escala 1:100 000 como base cartográfica (IGN, 1990).
- Imagen satelital Microsoft Bing (tipo Google Earth) a escala variable para uso informativo (Microsoft, 2022).
- Ráster de cobertura vegetal calculado a partir de imagen satelital SENTINEL 2B a resolución de píxel de 10 metros para configurar y ejecutar el modelo (ESA, 2020).

- Ráster de suelos Soil Map of the World (versión 3.6) a resolución de píxel de 8800 metros aproximadamente para configurar y ejecutar el modelo (FAO/UNESO, 1971).
- Ráster de Modelo Digital de Elevación Alos Palsar (versión 2) a resolución de píxel de 12.5 metros para configurar y ejecutar el modelo (JAXA/METI Alos Palsar (2015).

Información Hidro-meteorológica

- Estaciones ficticias sobre la cuenca estudiada del modelo PISCO (SENAMHI, 2016) con precipitaciones y temperaturas máximas y mínimas diarias (1981-2016).
- Estación hidrométrica (Tamboraque, San Mateo y Río Blanco) con aforos diarios completados (ANA, 1981-2002 y 2005-2016).

Información socioeconómica

- Población y actividad económica (INEI, 2015)

3.5.2 Equipos

- GPS Garmin GPSMAP 64s para georreferenciar el área de estudio.
- PC de escritorio con procesador x86-64 AMD Ryzen 5 3600, 16 GB de memoria RAM y gráfica Nvidia Geforce 3070 para ser usado en el procesamiento del modelo y redacción del informe.

3.5.3 Programas

- Microsoft Windows 10 Pro versión 21H2 como sistema operativo de todos los softwares a usar.

- ArcSWAT 2012.10_5.24 como software del modelo a usar.
- ESRI ArcGIS 10.5. con las extensiones 3D Analyst, Spatial Analyst, Geoprocessing y Projection Utility Wizard activadas que será el software SIG de entrada y salida de información al modelo, así como la elaboración de los mapas.
- SWAT-CUP 2019 5.2.1.1 para la calibración del modelo.
- RS Minerve 2.15
- Microsoft Office 2019: Microsoft Word en el tipiado del informe, Microsoft Excel en la preparación de los datos de entrada al modelo, Microsoft Power Point en el diseño de la presentación de la exposición y Microsoft Access en la lectura de la base de datos resultante del modelo.
- Python 3.9.7 con las librerías numpy, pylab, pandas, pylint, openpyxl, xlrd y xlwt instaladas para la programación de gráficos y análisis estadísticos de la información meteorológica e hidrométrica.
- Notepad++ 8.3 para la edición de los archivos de configuración del modelo.

3.6 Procedimientos

Etapas de validación de la aplicación del modelo

En esta etapa se realizó la clasificación, análisis sistemático y ordenamiento de la información existente sobre el área de estudio. Se visitó bibliotecas, buscó información en web (sobre todo por las investigaciones internacionales que no han sido publicados fuera de sus países), se aprendió los softwares relacionados al modelo SWAT, se recopiló los diversos registros numéricos y cartográficos que exige el modelo (cobertura vegetal, suelos, topografía, meteorología, hidrometría, entre otros), se planteó visitas de campo para la corroboración o

rectificación de la información encontrada en planos y libros, se entrevistó a expertos tanto en investigación en general como a especialistas en la rama de estudio de la tesis, entre otras acciones previas a la investigación en sí.

Luego de la compilación se ingresó la información recopilada al modelo, se corrió y ajustó (calibró). Esta etapa es crucial por plantear el diseño de la investigación, el título, los objetivos, y demás.

Etapa de estimación de caudales y sedimentos medios en escenario actual base

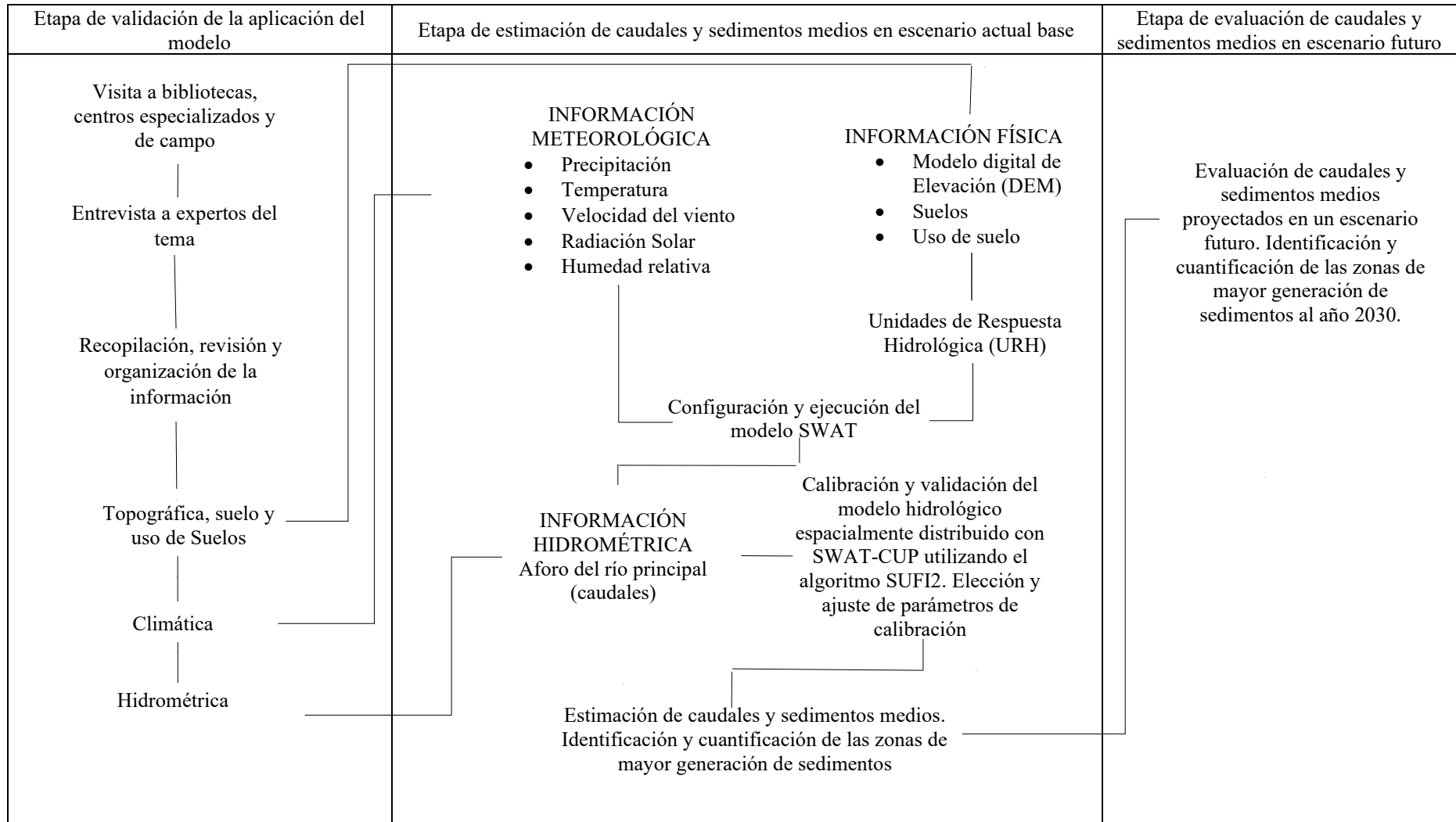
Para esta etapa ya se tiene calibrado el modelo, es decir, que los caudales que genera el modelo se correlacionan a los medidos en campo (aforos). Solo así se tiene la certeza que los valores de caudales y sedimentos arrojados por el modelo son confiables.

Aquí se obtuvo los caudales y sedimentos medios cuantitativa y espacialmente en la cuenca alta del río Rímac, así como por subcuencas. También se identificó y cuantificó las zonas de mayor generación de sedimentos.

Etapa de evaluación de caudales y sedimentos medios en escenario futuro

Aquí se obtuvo los caudales y sedimentos medios cuantitativa y espacialmente en la cuenca alta del río Rímac y subcuencas proyectados en un escenario futuro, así como las zonas de mayor generación de sedimentos al año 2030.

Figura 5.
Etapas y procedimientos de investigación



3.7 Análisis de datos

3.7.1 Técnicas de recolección de datos cuantitativos

En este punto se analizan los requisitos que un instrumento de medición debe cumplir para recolectar correctamente los datos cuantitativos: confiabilidad, validez y objetividad.

Fases de construcción de un instrumento:

1. Redefinir fundamentales
2. Revisar de literatura en instrumentos pertinentes
3. Identificar el dominio de variables a medir e indicadores
4. Tomar decisiones clave
5. Construir de instrumentos
6. Prueba piloto
7. Elaborar versión final de instrumento o sistema y su aplicación
8. Entrenamiento de personal administrador del instrumento e interpretar resultados
9. Obtener autorizaciones para aplicar instrumento
10. Administrar instrumento

Los datos recolectados en la presente investigación cumplen con representar correctamente las variables de investigación, también con los requisitos de confiabilidad, validez y objetividad.

3.7.2 Recolección de datos: Información de entrada del modelo SWAT

En la siguiente tabla se detallan las variables de entrada (*inputs*) del modelo y su respectiva fuente:

Tabla 8.
Información de entrada del modelo

MEDIO	TIPO	VARIABLE USADA	FUENTE Y AÑO	ESCALA DEL RASTER
Físico	Elevación / pendientes	DEM Alos Palsar	JAXA/METI, 2015	12.5 m/píxel
	Suelos	Mapa mundial de suelos y Mapa de suelos del Perú	FAO/UNESCO, 1971 y ONERN, 1976	1323 km/píxel y 529 km/píxel
	Uso de suelos / Cobertura vegetal	Análisis NDVI sobre SENTINEL 2B	ESA, 2020	10 m/píxel
Hídrico	Caudales medios diarios	Estaciones hidrométricas	SENAMHI, 2020	-
Meteorológico	Precipitación*	Producto Grillado PISCO	SENAMHI, 2017 (versión 2.0)	5 km/píxel
	Temperatura máxima y mínima*	Producto Grillado PISCO	SENAMHI, 2017 (versión 2.0)	5 km/píxel
	Velocidad del viento*	Motor climático CFSR	NCAR, 2017	38 km/píxel
	Humedad relativa*	Motor climático CFSR	NCAR, 2017	38 km/píxel
	Radiación solar*	Motor climático CFSR	NCAR, 2017	38 km/píxel

Nota. *Media diaria.

3.7.2.1 Información de entrada físicos.

A. Elevación o pendientes. Se ingresó el Ráster de elevaciones DEM Alos Palsar (JAXA/METI, 2015) al modelo para generar los flujos de agua (ríos), las subcuencas y las pendientes del terreno.

En la siguiente tabla se detallan los rangos usados para generar el Ráster de pendientes. Esta clasificación se dio para obtener clases con áreas similares (uniformemente distribuidas)

Tabla 9.
Clasificación de pendientes

CLASE	NOMBRE	LÍMITE INFERIOR (%)	LÍMITE SUPERIOR (%)
1	Plano a moderadamente ondulado.	0	12
2	Fuertemente ondulado.	12	25
3	Ligeramente empinado.	25	50
4	Fuertemente empinado.	50	75
5	Muy escarpado.	75	9999

B. Suelos. Se vio conveniente utilizar la clasificación del Mapa Mundial de Suelos (FAO/UNESCO, 1971) por la excelente documentación sobre el modelo SWAT, pero actualizándolo y mejorando con el Mapa de suelos del Perú (1976).

En la siguiente tabla se detallan los 4 suelos y sus parámetros presentes en el área de estudio.

Tabla 10.
Suelos

PARÁMETRO	CÓDIGO SWAT	UNIDAD	SUELOS				GLACIER-6998	WATER-6997
			I-BH-TV-C-5518		I-KL-C-5533			
			CAPA					
			1	2	1	2		
Grupo hidrológico	HYDGRP	Adimensional – A, B, C o D	C		C		D	D
Profundidad máxima de enraizamiento en el perfil	SOL_ZMX	mm – De 0 a 3500	670		550		1524	25.4

Fracción de porosidad	ANION_EXCL	Adimensional – De 0.01 a 1	0.5		0.5		0.5	0.5
Volumen máximo de ruptura del perfil	SOL_CRK	m ³ /m ³ – De 0 a 1	0.5		0.5		0.5	0.5
Textura (opcional)	TEXTURE	Alfabético	LOAM		LOAM		UWB	WATER
Profundidad de cada capa	SOL_Z	mm – De 0 a 3500	300	1000	300	1000	1524	25
Densidad aparente de cada capa	SOL_BD	gr/cm ³ – De 0.9 a 2.5	1	1.1	1.3	1.4	2.5	0.9
Capacidad de agua disponible para las plantas de cada capa	SOL_AWC	mm/mm – De 0 a 1	0.122	0.122	0.098	0.098	0.01	0
Contenido de carbono orgánico de cada capa	SOL_CBN	% peso – De 0.05 a 10	2.8	1.2	1.4	0.7	0.05	0.05
Conductividad hidráulica saturada por capa	SOL_K	mm/hr – De 0 a 2000	45.93	24.75	9.02	4.95	99	99
Contenido de arcilla de cada capa	CLAY	% peso – De 0 a 100	19	21	21	26	5	0
Contenido de limo de cada capa	SILT	% peso – De 0 a 100	43	31	42	33	25	0
Contenido de arena de cada capa	SAND	% peso – De 0 a 100	39	47	38	42	70	0
Contenido de fragmento de roca de cada capa	ROCK	% peso – De 0 a 100	0	0	0	0	98	0
Albedo de cada capa	SOL_ALB	Adimensional – De 0 a 0.25	0.0022	0.0484	0.0329	0.1269	0.23	0.23
Factor k de erodabilidad de usle de cada capa	USLE_K	Adimensional – De 0 a 0.65	0.2671	0.2671	0.2798	0.2798	0.01	0
Conductividad eléctrica de cada capa	SOL_EC	dS/m – De 0 a 100	0	0	0	0	0	0
Contenido de carbonato calcio de cada capa	SOL_CAL	% – De 0 a 65	0	0	0	0	0	0
Ph	SOL_PH	Adimensional – De a 10	0	0	0	0	0	0
Unidades de Suelos								

I-BH-TV-C-5518	Litosol - Cambisol húmico - Andosol vítrico - fuertemente socavado a montañoso
I-KL-C-5533	Litosol - Kastanozem lúvico - fuertemente socavado a montañoso
GLACIER-6998	Glaciar
WATER-6997	Cuerpos de agua

Nota. Adaptado de FAO/UNESCO, 1971.

En el “Mapa 09. Mapa de suelos” (figura 33) se muestra la clasificación de suelos utilizados en el modelo.

C. Uso de suelos o Cobertura vegetal. Para la clasificación de la cobertura vegetal se hizo un análisis previo con imágenes satelitales SENTINEL 2B y la técnica NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) ya que nos permite obtener la realidad más actualizada y con la mejor resolución espacial del medio (10 m/píxel).

Se utilizó la siguiente tabla de equivalencia para clasificar la cobertura vegetal según su NDVI, esta ha sido propuesta y evaluada por el autor de esta investigación solo para la cuenca alta de río Rímac, pudiéndose usar en cuencas cercanas previa evaluación.

Tabla 11.
Clasificación de Cobertura vegetal según su NDVI

RANGO	COBERTURAVEGETAL	CÓDIGO DE COBERTURA VEGETAL
-1 – 0.05	Agua, nieve y hielo	WATR
0.05– 0.2	Escasa/estéril vegetación	SWRN
0.2 – 0.4	Arbusto/matorral	RRGB
0.4 – 0.6	Césped/Pasto	PAST
0.6 – 0.7	Bosque mixto	FRST
0.7 – 1.0	Humedal	WETL
_*	Tierra agrícola general / cereales	AGRL

*Clasificación manual - visual

En el “Mapa 21. Mapa de cobertura vegetal” (figura 47) se muestra la cobertura vegetal procesada desde imagen satelital SENTINEL 2B.

En la siguiente tabla se resume las pendientes, suelo y uso de suelo / cobertura vegetal presentes en el área de estudio.

Tabla 12.

Pendientes, suelo y uso de suelo / cobertura vegetal presentes en el área de estudio

VARIABLE	NOMBRE	CÓDIGO	ÁREA (Km ²)	ÁREA DE LA SUBCUENCA (%)
Pendientes	Plano a moderadamente ondulado.	0-12	30.9395	5.25
	Fuertemente ondulado.	12-25	73.647	12.49
	Ligeramente empinado.	25-50	207.1194	35.13
	Fuertemente empinado.	50-75	172.7088	29.29
	Muy escarpado.	75-9999	105.1828	17.84
Suelos	Glaciar	GLACIER-6998	1.6653	0.28
	Litosol - Cambisol húmico - Andosol vítrico - fuertemente socavado a montañoso	I-Bh-Tv-c-5518	509.9814	86.50
	Litosol - Kastanozem lúvico - fuertemente socavado a montañoso	I-Kl-c-5533	73.0761	12.39
	Cuerpos de agua	WATER-6997	4.8747	0.83
Uso de suelo / cobertura vegetal	Agua, nieve y hielo	WATR	54.1608	9.19
	Escasa/estéril vegetación	SWRN	258.8794	43.91
	Arbusto/matorral	RNGB	214.4342	36.37
	Césped/Pasto	PAST	44.0911	7.48
	Bosque mixto	FRST	7.7953	1.32
	Humedal	WETL	4.2773	0.73
	Tierra agrícola general / cereales	AGRL	5.9594	1.01

3.7.2.2 Información de entrada hídricos.

A. Estaciones hidrométricas. Se utilizó estaciones hidrométricas reales de campo para la etapa de calibración del modelo con data de SENAMHI (2020), específicamente la variable de caudales medios diarios desde el 1ro de enero de 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016. En la siguiente tabla se muestra las estaciones utilizadas.

Tabla 13.
Ubicación de estaciones hidrométricas

ESTACIÓN	COORDENADAS WGS84		COORDENADAS UTM WGS84 ZONA 18 SUR		ALTITUD (msnm)
	LATITUD	LONGITUD	ESTE	NORTE	
Río Blanco	-11.734528	-76.258889	362 816	8 702 495	3 529
San Mateo	-11.760167	-76.301000	358 239	8 699 638	3 181
Tamboraque	-11.785563	-76.310187	357 251	8 696 825	2 951

Nota. Adaptado de SENAMHI, 2020.

En el “Mapa 14. Mapa de estaciones meteorológicas e hidrométricas” (figura 38) se muestra la ubicación de las estaciones hidrométricas utilizadas. La Est. Tamboraque se usó para la calibración y las estaciones de Río Blanco y San Mateo como comprobación, esto por ser Tamboraque la estación más completa en la línea de tiempo, esto conlleva a que también sea el límite de la cuenca en el modelo.

En la siguiente tabla y figura se muestran los caudales medios mensuales de las estaciones hidrométricas utilizadas.

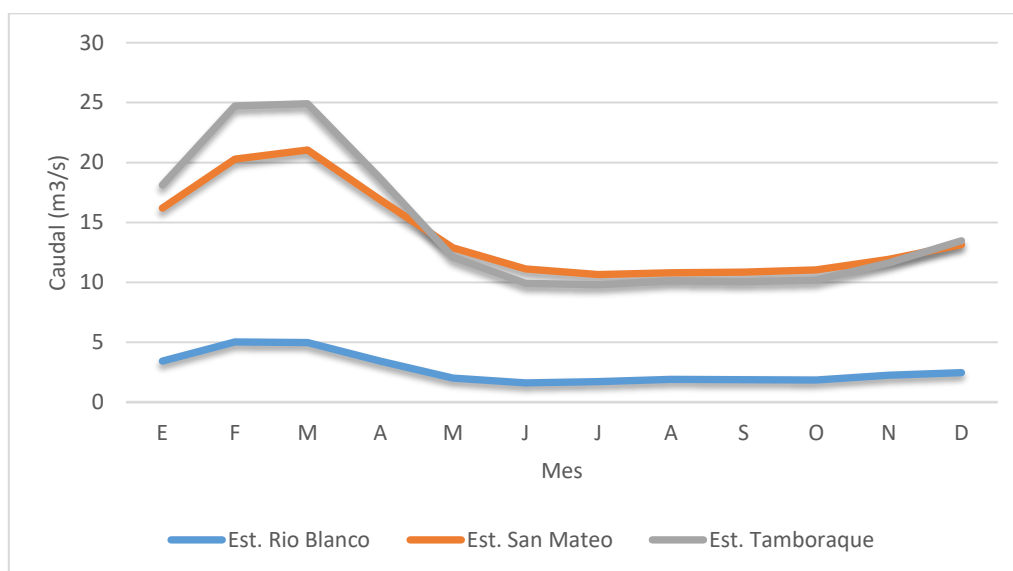
Tabla 14.
Caudales medios mensuales (m^3/s) de las estaciones hidrométricas

ESTACIÓN	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	\bar{X}
Est. Río Blanco	3.4	5.0	5.0	3.4	2.0	1.6	1.7	1.9	1.9	1.9	2.2	2.5	2.7
Est. San Mateo	16.2	20.3	21.0	16.9	12.9	11.1	10.7	10.8	10.9	11.0	11.9	13.2	13.9

Est. Tamboraque	18.1	24.7	24.9	18.7	12.1	9.9	9.8	10.1	10.1	10.2	11.6	13.5	14.4
-----------------	------	------	------	------	------	-----	-----	------	------	------	------	------	------

Nota. Adaptado de SENAMHI, 2020.

Figura 6.
Caudales medios mensuales de las estaciones hidrométricas



Nota. Adaptado de SENAMHI, 2020.

3.7.2.3 Información de entrada meteorológicas.

A. Estaciones meteorológicas de precipitación, temperatura máxima y mínima. Se

utilizó al producto grillado PISCO (SENAMHI, 2017) por ofrecer información completa y corregida a lo largo del área de estudio, específicamente precipitación, temperatura máxima y mínima diaria desde el 1ro de enero de 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016. En etapas tempranas del modelo se intentó con estaciones convencionales, pero no ofrecieron tan buenos resultados como PISCO, esto puede ser debido a las pocas estaciones encontradas de manera libre. La elección de puntos fue sobre estaciones convencionales para efectos de comparación y de estaciones ficticias para completar puntos distribuidos uniformemente dentro y fuera el área de estudio, no son propiamente estaciones, se les considerará así para efectos ilustrativos, tampoco tienen nombre.

Tabla 15.

Ubicación de estaciones meteorológicas del producto grillado PISCO para precipitación, temperatura máxima y mínima

ESTACIÓN	COORDENADAS WGS84		COORDENADAS UTM WGS84 ZONA 18 SUR		ALTITUD (msnm)
	LATITUD	LONGITUD	ESTE	NORTE	
Casapalca	-11.648000	-76.233417	365 550	8 712 077	4 219
Ficticia 1	-11.587694	-76.248239	363 905	8 718 740	4 701
Ficticia 2	-11.714380	-76.298567	358 481	8 704 704	4 600
Ficticia 3	-11.884981	-76.092054	381 063	8 685 931	4 549
Ficticia 4	-11.773248	-76.305507	357 755	8 698 189	3 045
Ficticia 5	-11.596017	-76.173144	372 097	8 717 854	4 653
Matucana	-11.839111	-76.378000	349 890	8 690 867	2 445
Pachachaca	-11.616667	-76.033333	387 350	8 715 629	4 140
Pomacocha	-11.717000	-76.116667	378 308	8 704 499	4 325
Rio Blanco	-11.734528	-76.259000	362 804	8 702 495	3 529
San José de Parac	-11.800528	-76.258000	362 945	8 695 196	3 859
Yuracmayo	-11.839525	-76.158000	373 859	8 690 930	4 336

Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

En el “Mapa 14. Mapa de estaciones meteorológicas e hidrométricas” (figura 38) se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

En las siguientes tablas y figuras se muestran la precipitación, temperatura máxima y mínima media mensual de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Tabla 16.

Precipitación media mensual (mm) de las estaciones meteorológicas

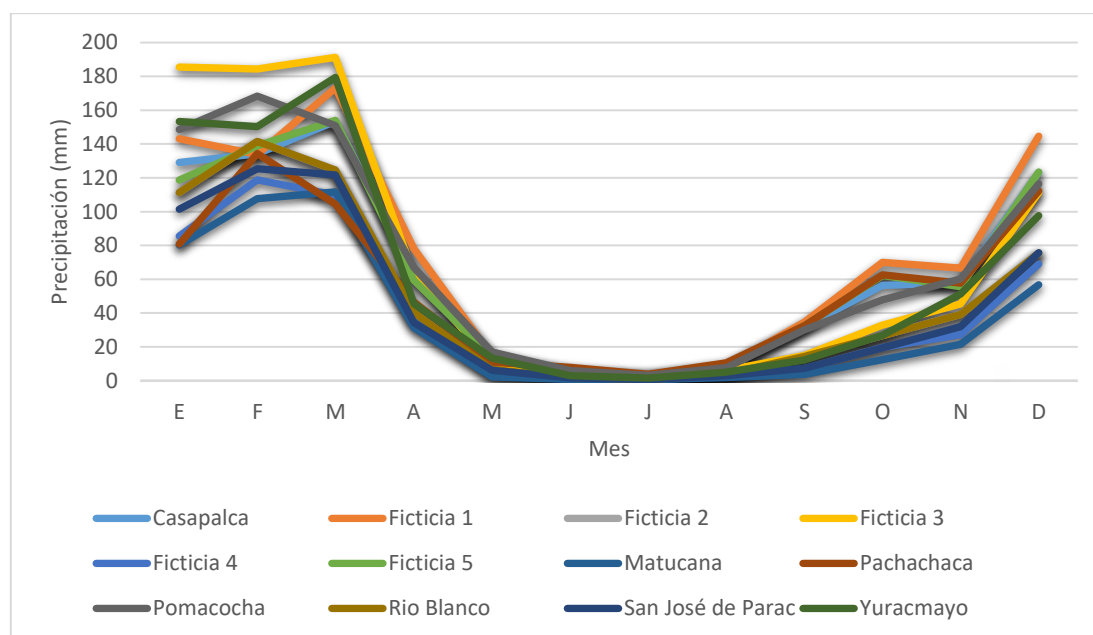
ESTACIÓN	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Σ
Casapalca	129	134	153	63	15	5	2	7	32	56	58	123	778
Ficticia 1	143	134	173	78	15	5	3	8	35	70	67	145	875

Ficticia 2	111	142	125	40	7	2	1	4	14	27	39	75	586
Ficticia 3	186	184	191	63	11	4	3	6	15	33	45	111	852
Ficticia 4	86	119	110	36	4	1	0	3	7	20	27	69	481
Ficticia 5	119	139	154	59	14	5	3	9	33	62	56	123	776
Matucana	80	108	112	31	2	1	1	2	4	12	22	57	430
Pachachaca	81	134	105	47	11	8	4	11	32	63	58	112	664
Pomacocha	149	168	151	67	17	6	3	8	30	48	60	116	823
Rio Blanco	111	142	125	40	7	2	1	4	14	27	39	75	586
San José de Parac	101	125	122	34	6	2	1	3	7	19	32	76	528
Yuracmayo	153	150	179	46	13	3	2	5	12	27	51	98	739

Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

Figura 7.

Precipitación media mensual (mm) de las estaciones meteorológicas



Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

Tabla 17.

Temperatura máxima media mensual (°C) de las estaciones meteorológicas

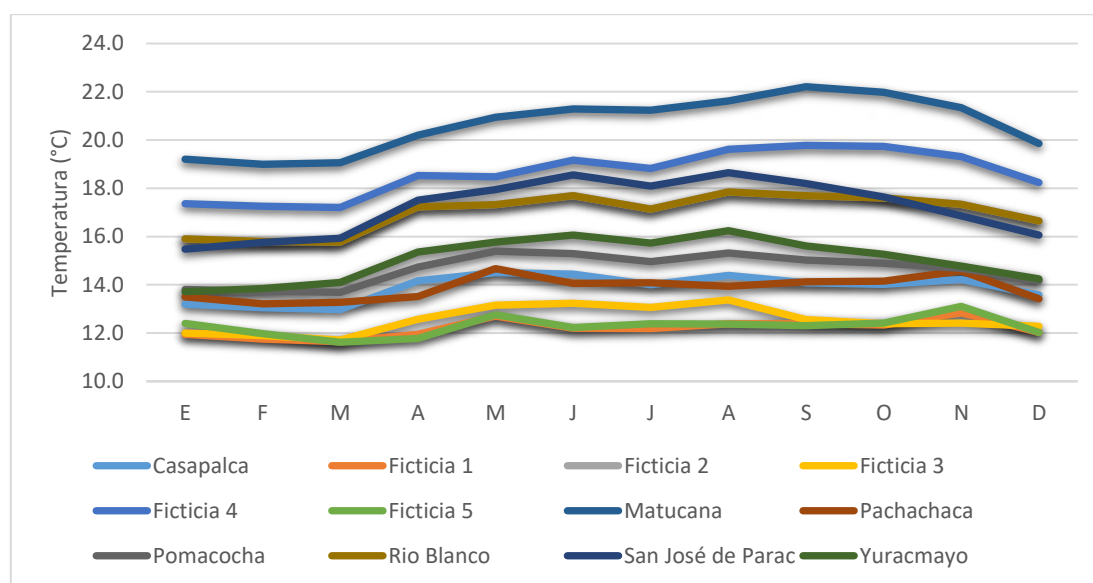
ESTACIÓN	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	\bar{X}
Casapalca	13.2	13.0	13.0	14.2	14.5	14.4	14.0	14.4	14.1	14.0	14.2	13.6	13.9
Ficticia 1	11.9	11.7	11.6	11.9	12.7	12.2	12.2	12.4	12.4	12.3	12.8	12.0	12.2

Ficticia 2	15.9	15.8	15.8	17.2	17.3	17.7	17.1	17.8	17.7	17.6	17.3	16.6	17.0
Ficticia 3	12.0	11.9	11.7	12.6	13.2	13.2	13.1	13.4	12.6	12.4	12.4	12.3	12.6
Ficticia 4	17.4	17.3	17.2	18.5	18.5	19.2	18.8	19.6	19.8	19.7	19.3	18.2	18.6
Ficticia 5	12.4	12.0	11.6	11.8	12.8	12.2	12.4	12.4	12.3	12.4	13.1	12.0	12.3
Matucana	19.2	19.0	19.1	20.2	21.0	21.3	21.2	21.6	22.2	22.0	21.3	19.9	20.7
Pachachaca	13.5	13.2	13.3	13.5	14.7	14.1	14.1	13.9	14.1	14.1	14.6	13.4	13.9
Pomacocha	13.8	13.7	13.7	14.7	15.4	15.3	15.0	15.3	15.0	14.9	14.7	14.2	14.6
Rio Blanco	15.9	15.8	15.8	17.2	17.3	17.7	17.1	17.8	17.7	17.6	17.3	16.6	17.0
San José de Parac	15.5	15.8	15.9	17.5	17.9	18.5	18.1	18.6	18.2	17.6	16.9	16.1	17.2
Yuracmayo	13.7	13.9	14.1	15.4	15.8	16.1	15.7	16.2	15.6	15.3	14.8	14.2	15.1

Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

Figura 8.

Temperatura máxima media mensual (°C) de las estaciones meteorológicas



Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

Tabla 18.

Temperatura mínima media mensual (°C) de las estaciones meteorológicas

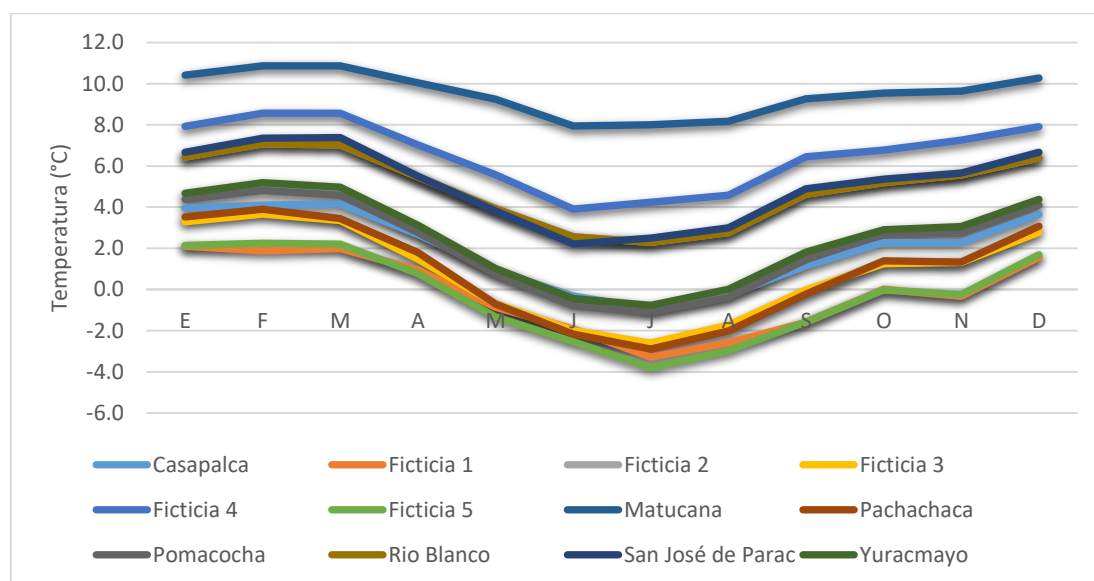
ESTACIÓN	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	\bar{X}
Casapalca	4.0	4.1	4.1	2.7	0.9	-0.3	-1.0	-0.3	1.1	2.3	2.3	3.7	2.0
Ficticia 1	2.1	1.9	2.0	1.0	-0.9	-1.9	-3.3	-2.6	-1.6	0.0	-0.3	1.6	-0.2
Ficticia 2	6.4	7.1	7.0	5.5	3.9	2.6	2.3	2.8	4.6	5.2	5.6	6.4	4.9

Ficticia 3	3.3	3.7	3.3	1.5	-0.7	-2.0	-2.6	-1.7	0.0	1.3	1.3	2.8	0.8
Ficticia 4	7.9	8.6	8.6	7.0	5.6	3.9	4.2	4.6	6.5	6.8	7.3	7.9	6.6
Ficticia 5	2.1	2.2	2.2	0.8	-1.3	-2.5	-3.8	-3.0	-1.6	0.0	-0.3	1.7	-0.3
Matucana	10.4	10.9	10.9	10.0	9.2	7.9	8.0	8.2	9.3	9.5	9.6	10.3	9.5
Pachachaca	3.5	3.9	3.4	1.8	-0.7	-2.2	-2.9	-2.0	-0.2	1.4	1.3	3.1	0.9
Pomacocha	4.4	4.8	4.6	2.8	0.7	-0.8	-1.1	-0.4	1.4	2.7	2.7	4.1	2.2
Rio Blanco	6.4	7.1	7.0	5.5	3.9	2.6	2.3	2.8	4.6	5.2	5.6	6.4	4.9
San José de Parac	6.7	7.4	7.4	5.5	3.8	2.2	2.5	3.0	4.9	5.4	5.7	6.7	5.1
Yuracmayo	4.7	5.2	5.0	3.1	1.0	-0.4	-0.8	0.0	1.8	2.9	3.1	4.4	2.5

Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

Figura 9.

Temperatura mínima media mensual (°C) de las estaciones meteorológicas



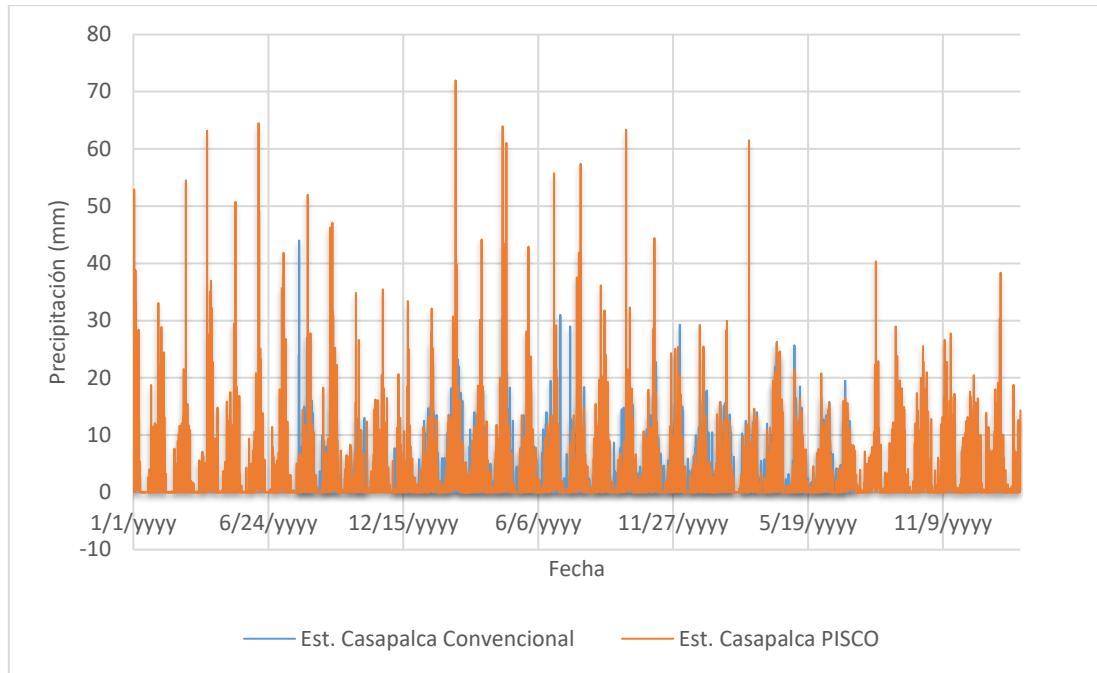
Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

Con la información de PISCO se calculó la precipitación media anual del área de estudio siendo de 781 mm, de igual manera para la temperatura mínima y máxima arrojando 1.2 °C y 13.6 °C respectivamente.

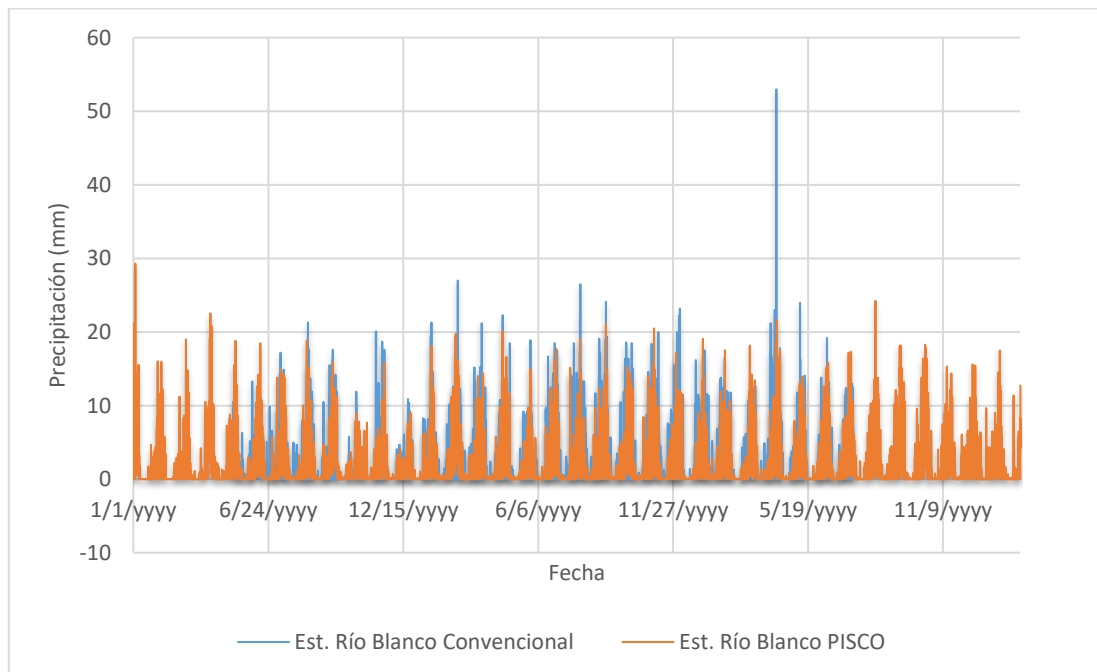
En las siguientes figuras se muestra la comparación visual entre las estaciones convencionales y del producto grillado PISCO.

Figura 10.

Comparación entre datos PISCO y convencional de precipitación diaria en la Est. Casapalca

**Figura 11.**

Comparación entre datos PISCO y convencional de precipitación diaria en la Est. Río Blanco

**Figura 12.**

Comparación entre datos PISCO y convencional de precipitación diaria en la Est. San José de Parac

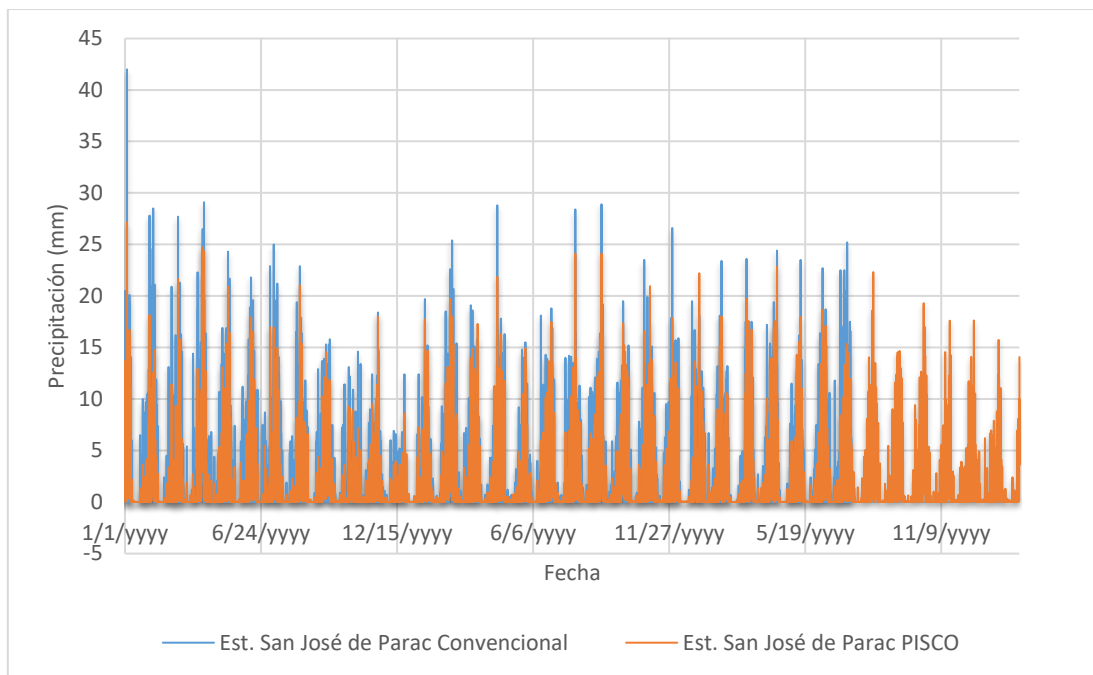


Figura 13.
Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura máxima diaria en la Est. Matucana

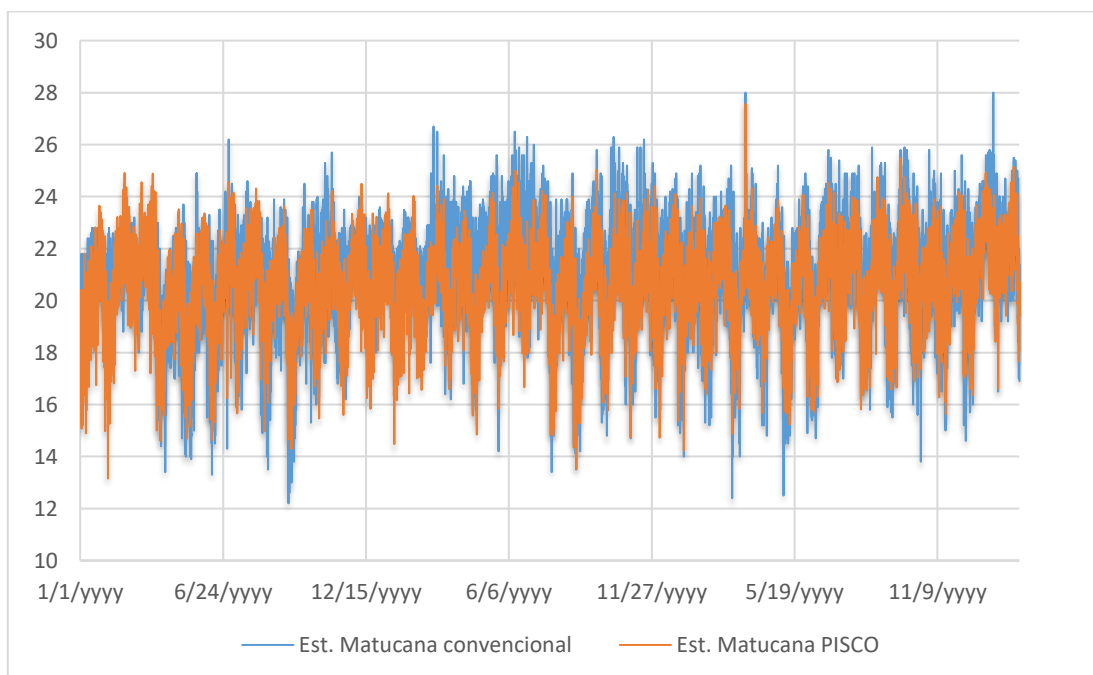


Figura 14.
Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura máxima diaria en la Est. Pachachaca

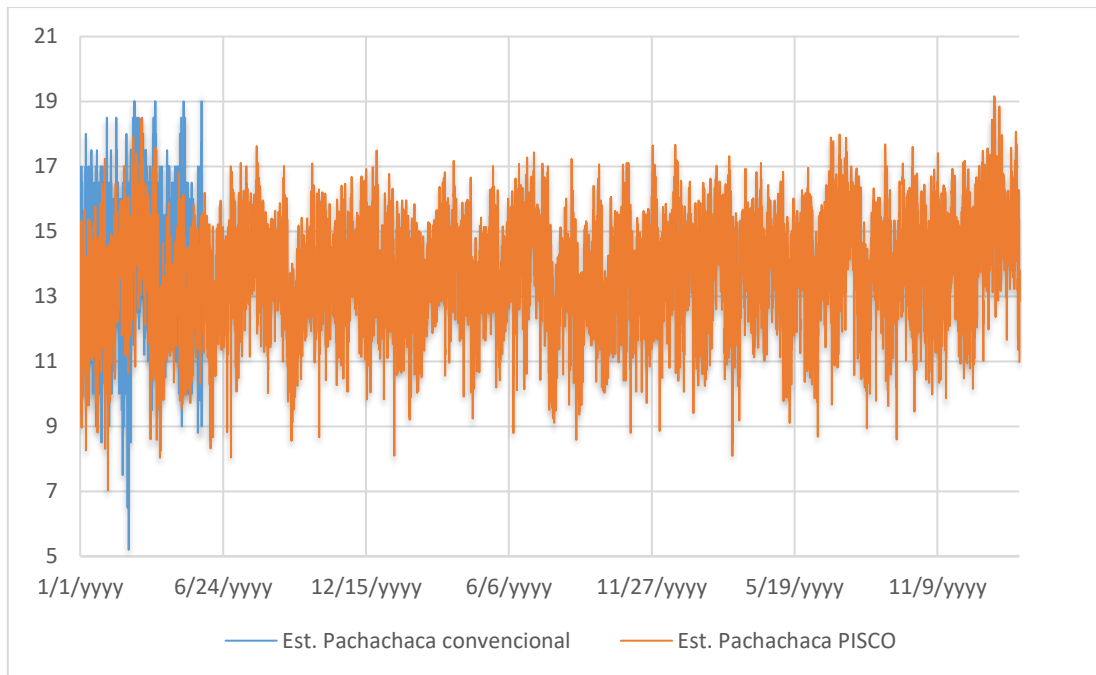


Figura 15.
Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura máxima diaria en la Est. Pomacocha

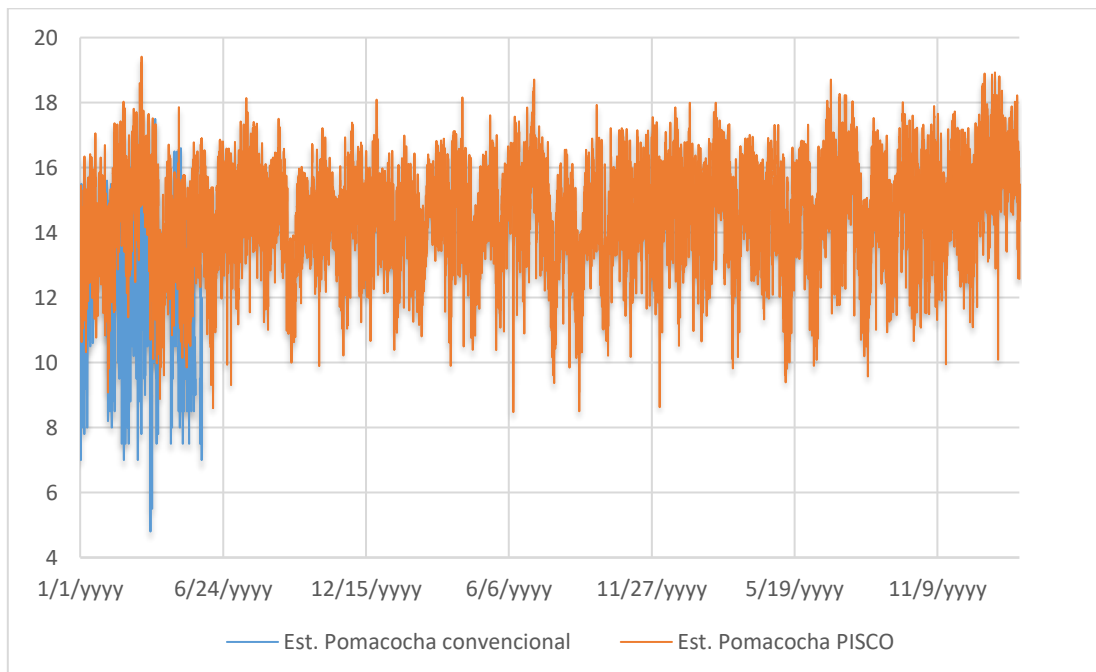


Figura 16.
Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura mínima diaria en la Est. Matucana

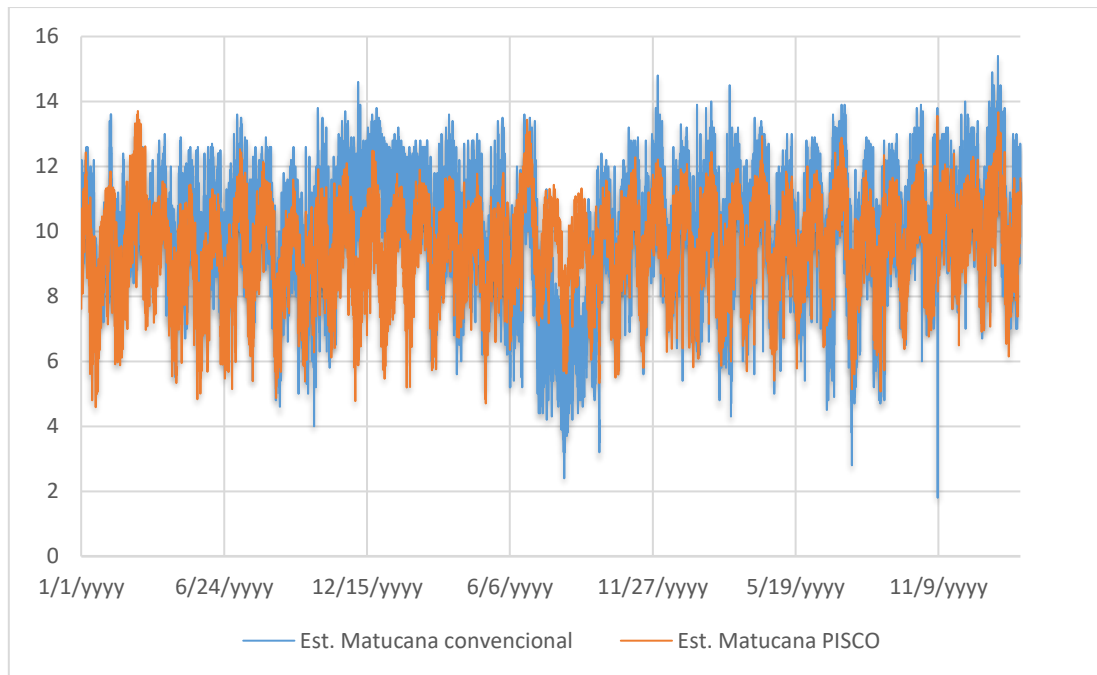


Figura 17.
Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura mínima diaria en la Est. Pachachaca

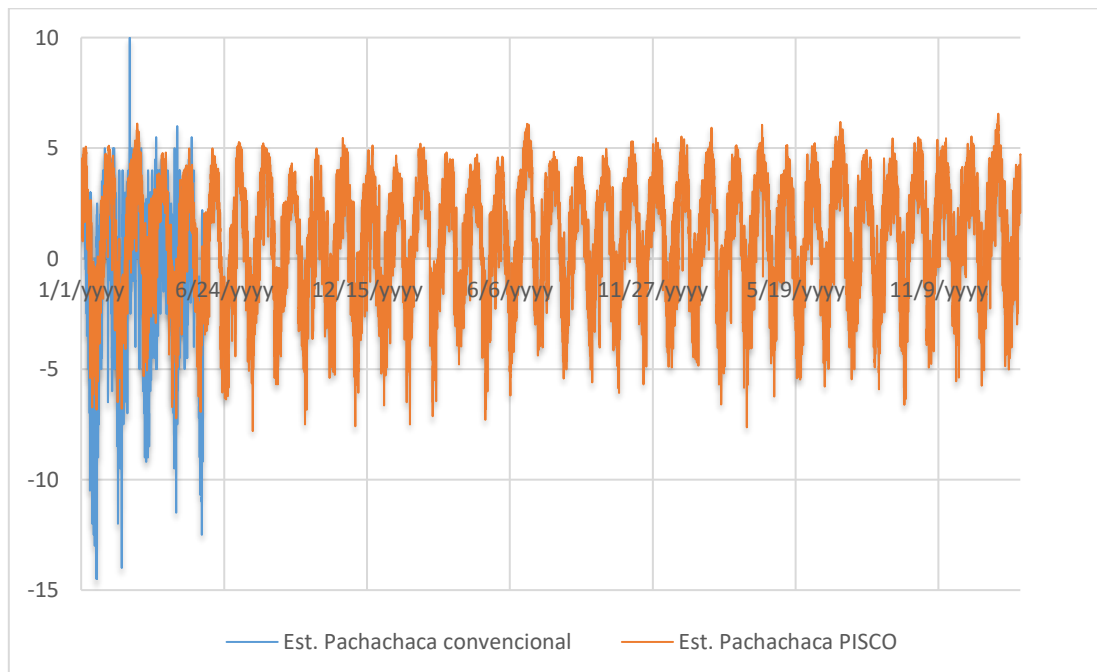
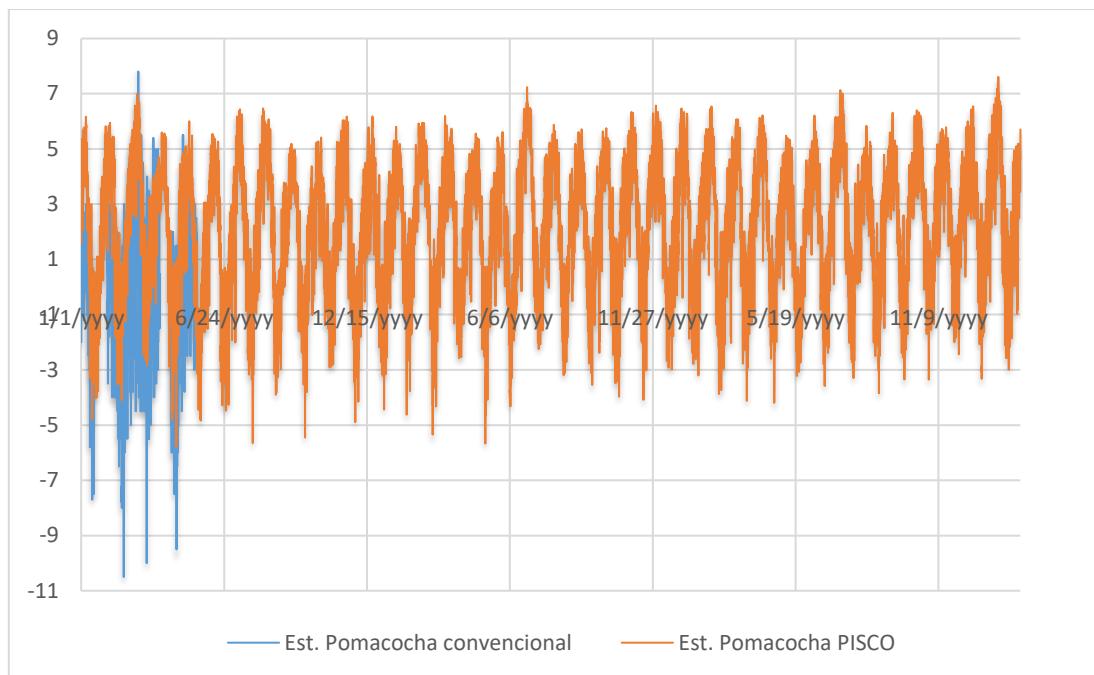


Figura 18.
Comparación entre datos PISCO y convencional de temperatura mínima diaria en la Est. Pomacocha



B. Estaciones meteorológicas de velocidad del viento, humedad relativa y radiación

solar. Se utilizó los datos generados por el motor climático CFSR (NCAR, 2017) para las variables de velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar diaria desde el 1ro de enero de 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016. Estas variables son poco usuales en las estaciones meteorológicas convencionales en el Perú, incluso en fuentes de información de pago (no libre), imposibilitando la ejecución de modelos como SWAT, tan exigentes en datos de entrada. Entonces, se ha elegido al motor climático CFSR por brindar esa información faltante en el medio peruano; la calidad del modelo no se ve disminuida por la elección de este motor (informático) en vez de estaciones de campo por ser en realidad variables no tan “importantes” en comparación con la precipitación y temperatura. Los buenos los resultados de esta y otras investigaciones lo demostraría.

Las estaciones (puntos) elegidos para estas variables son las mismas que las utilizadas en el producto grillado PISCO. Lamentablemente el motor (al menos la implementación en SWAT) es una “caja negra” y no se pueden saber los resultados generados, simplemente SWAT los procesa directamente sin mostrarlos al usuario.

Tabla 19.

Ubicación de estaciones meteorológicas del motor climático CFSR para velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar

ESTACIÓN	COORDENADAS WGS84		COORDENADAS UTM WGS84 ZONA 18 SUR		ALTITUD (msnm)
	LATITUD	LONGITUD	ESTE	NORTE	
Casapalca	-11.648000	-76.233417	365 550	8 712 077	4 219
Ficticia 1	-11.587694	-76.248239	363 905	8 718 740	4 701
Ficticia 2	-11.714380	-76.298567	358 481	8 704 704	4 600
Ficticia 3	-11.884981	-76.092054	381 063	8 685 931	4 549
Ficticia 4	-11.773248	-76.305507	357 755	8 698 189	3 045
Ficticia 5	-11.596017	-76.173144	372 097	8 717 854	4 653
Matucana	-11.839111	-76.378000	349 890	8 690 867	2 445
Pachachaca	-11.616667	-76.033333	387 350	8 715 629	4 140
Pomacocha	-11.717000	-76.116667	378 308	8 704 499	4 325
Rio Blanco	-11.734528	-76.259000	362 804	8 702 495	3 529
San José de Parac	-11.800528	-76.258000	362 945	8 695 196	3 859
Yuracmayo	-11.839525	-76.158000	373 859	8 690 930	4 336

Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

En el “Mapa 14. Mapa de estaciones meteorológicas e hidrométricas” (figura 38) se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

3.7.3 Métodos estadísticos para el análisis de información

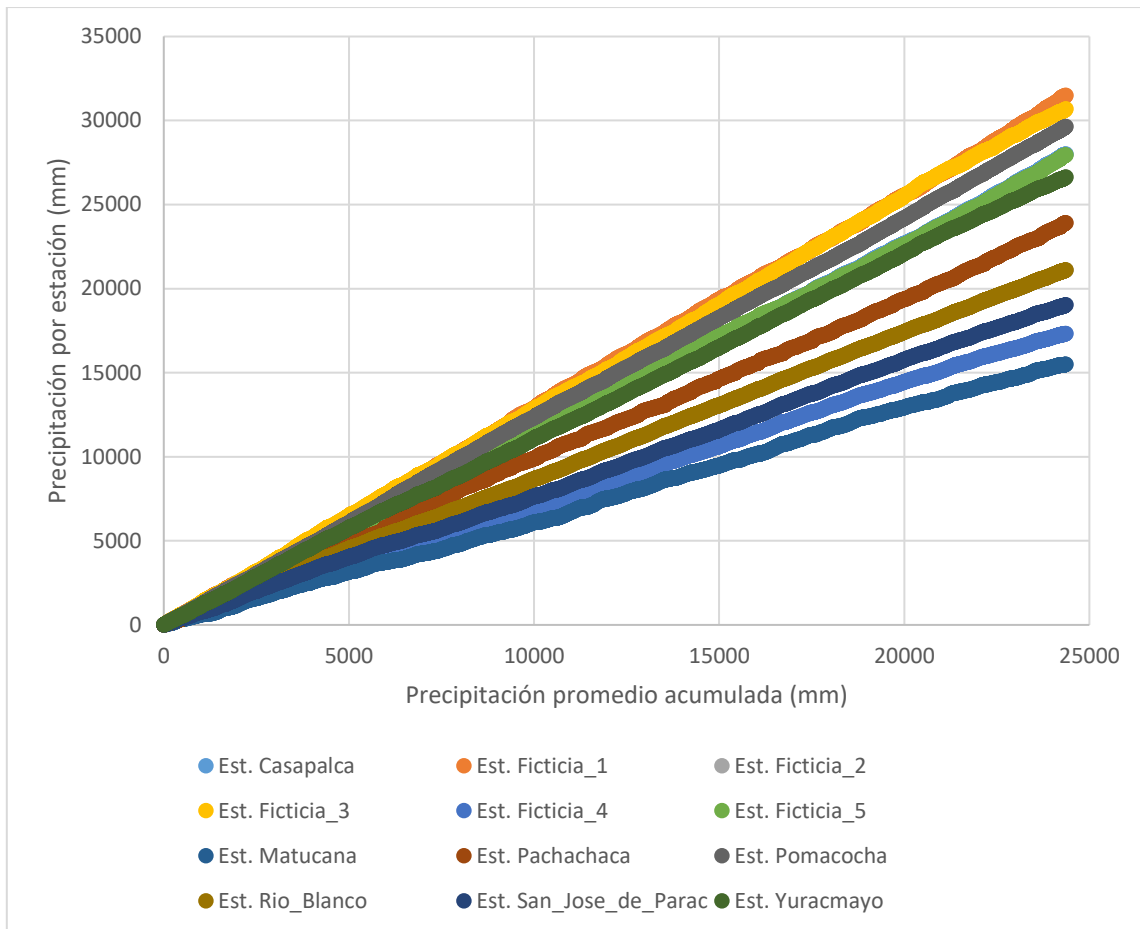
Se comprobó la información de entrada al modelo según su tipo, los de registro numéricos del producto grillado PISCO (precipitación y temperatura) con un análisis de doble masa e inspección visual a estaciones cercanas, y los de tipo imágenes ráster se corroboró con una visita a campo (ver capítulo IX Anexos).

Se realizó un análisis comparativo del producto grillado PISCO con la información histórica de estaciones meteorológicas cercanas, dando una buena correlación tanto visual como estadística (coeficiente de correlación R^2). El producto grillado PISCO es utilizado como uno de los principales insumos en el modelo SWAT de la presente investigación, ofrece precipitación, temperatura máxima y mínima diaria.

Análisis de doble masa para registros numéricos de precipitación histórica

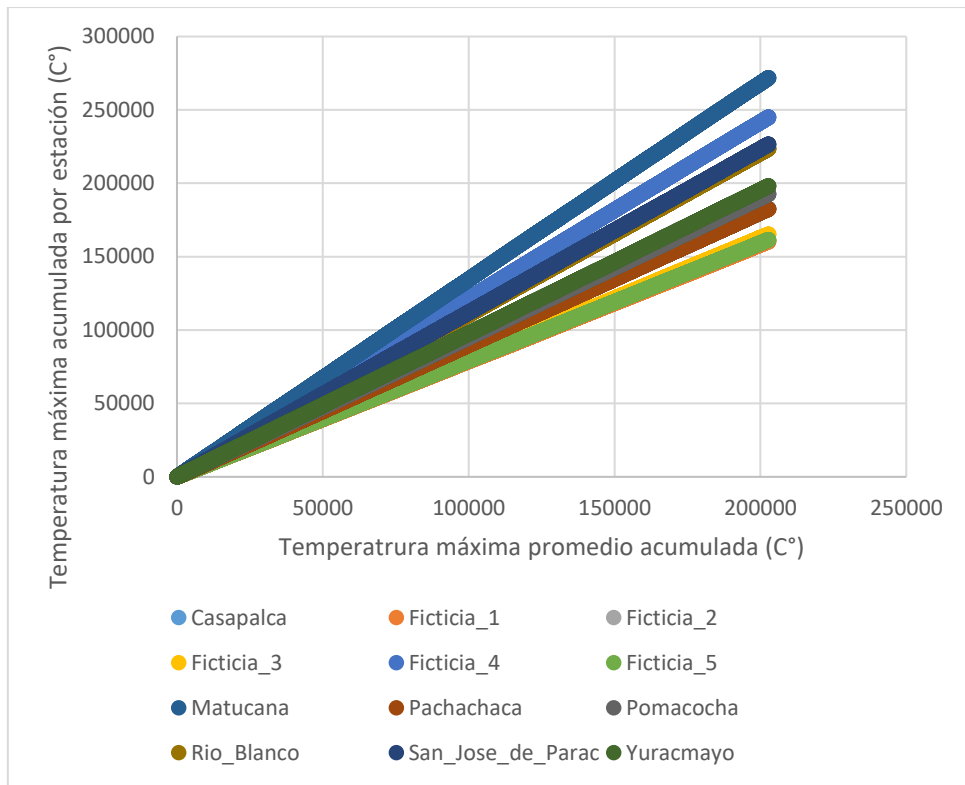
Se analizó la información de precipitación y temperatura de PISCO (1981-2016) con el método de la doble masa para comprobar si la información presentaba inconsistencia. En los siguientes gráficos se aprecia las líneas rectas en cada una de las estaciones por lo que se verifica que la información climática usada en el modelo es consistente y no se necesita modificación o preparación de datos.

Figura 19.
Análisis de doble masa en la precipitación PISCO (1981-2016)



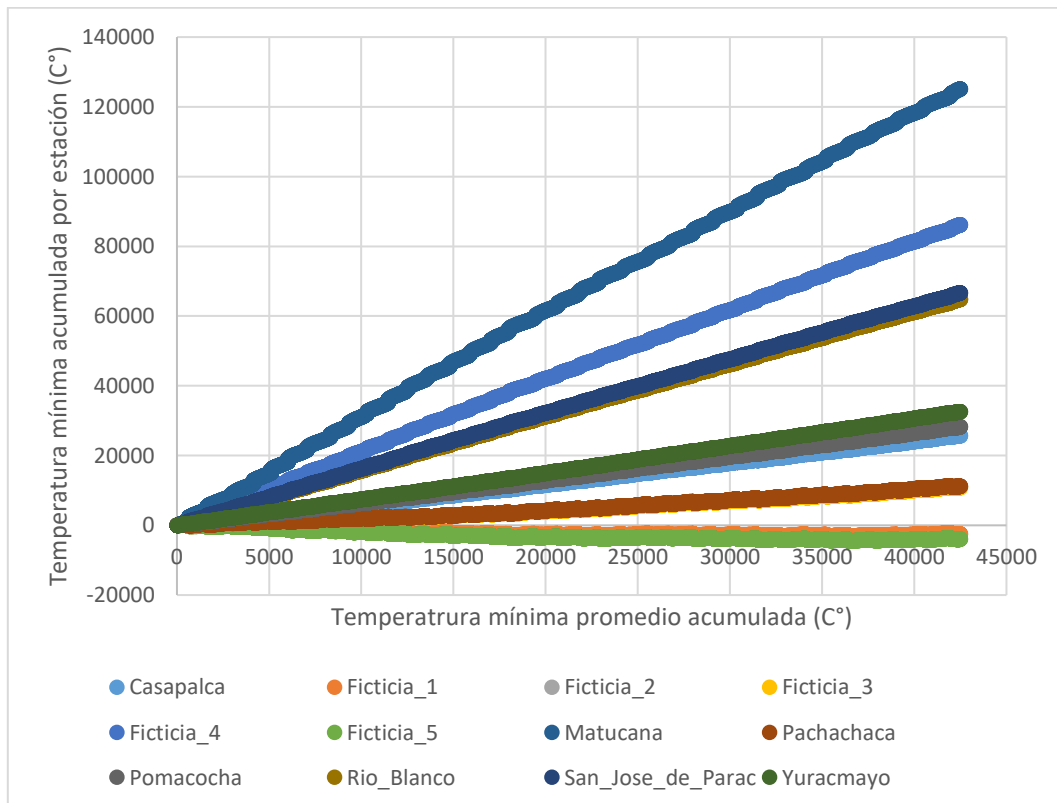
Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

Figura 20.
Análisis de doble masa en la temperatura máxima PISCO (1981-2016)



Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

Figura 21.
Análisis de doble masa en la temperatura mínima PISCO (1981-2016)



Nota. Adaptado de SENAMHI, 2017.

3.8 Consideraciones éticas de la investigación

La investigación científica y el uso del conocimiento por la ciencia exigen conductas éticas en el investigador. Una conducta no ética no tiene lugar en la práctica científica. La investigación científica es una práctica de la libertad, sin embargo, los problemas, los métodos, la comunicación y la divulgación plantean algunos conflictos.

La presente investigación cuantitativa usa únicamente fuentes externas o terciarias que ya están publicadas por instituciones oficiales. El investigador no afecta o hace daño a los habitantes del área de estudio usando dicha información ya que los resultados de la investigación no influyen o alteran a su población o su calidad de vida. Por último, el investigador no obtiene beneficios con la presente investigación.

3.9 Descripción del área de estudio

3.9.1 Ubicación

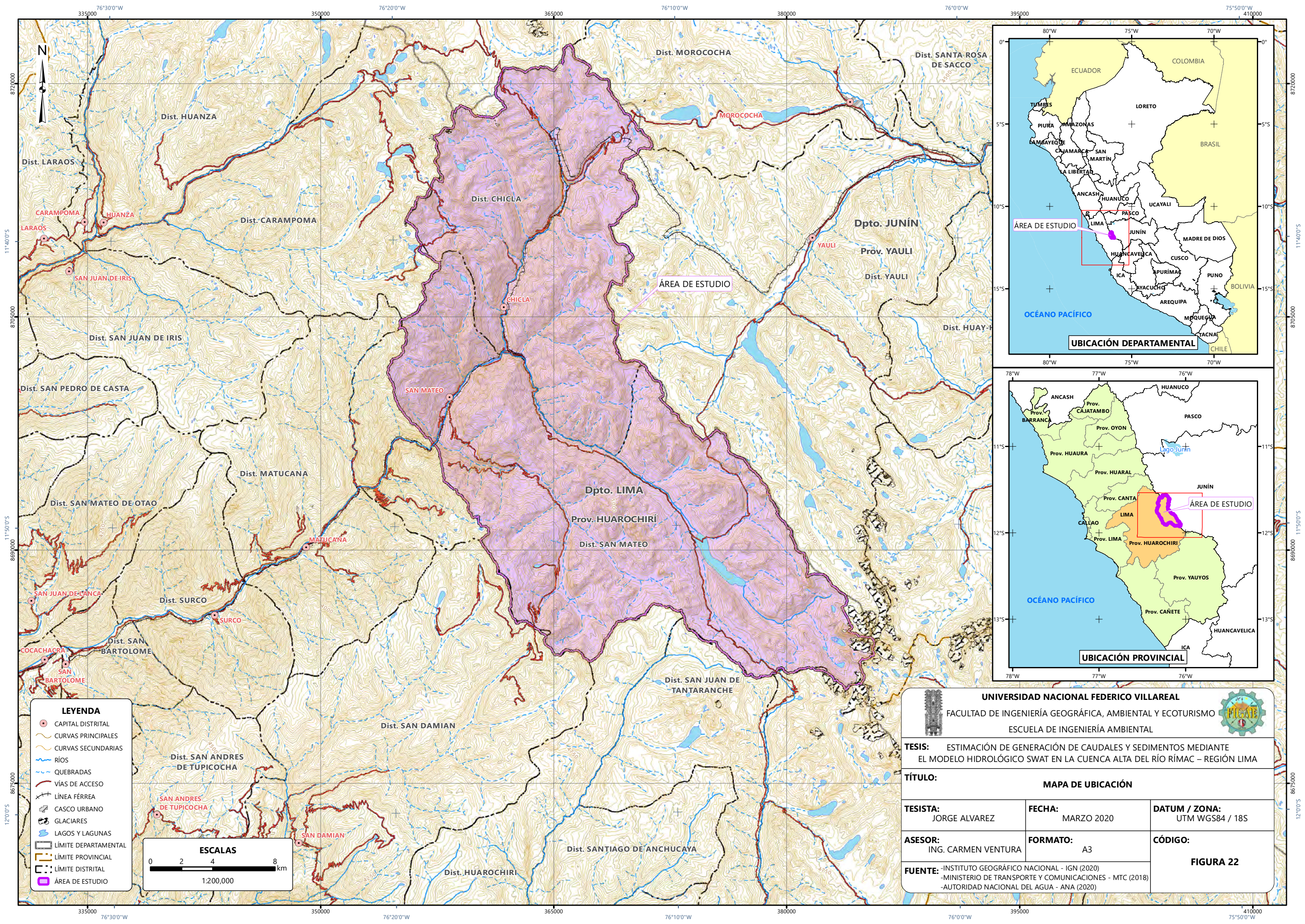
3.9.1.1 Ubicación política.

La investigación se desarrolla en los distritos de San Mateo y Chicla, provincia de Huarochirí, región Lima Provincias. El área de estudio posee una superficie de 589.5975 Km².

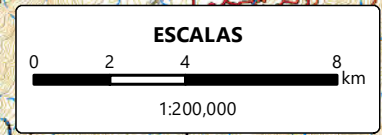
Figura 22.

Figura de Mapa de Ubicación que muestra el área de estudio de la presente investigación.

(siguiente página)



- LEYENDA**
- CAPITAL DISTRITAL
 - CURVAS PRINCIPALES
 - CURVAS SECUNDARIAS
 - RÍOS
 - QUEBRADAS
 - VÍAS DE ACCESO
 - LÍNEA FÉRREA
 - CASCO URBANO
 - GLACIARES
 - LAGOS Y LAGUNAS
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE UBICACIÓN

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 22

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)

3.9.1.2 Ubicación geográfica

La investigación se desarrolla en la cuenca alta del río Rímac, que alimenta gran parte de la red de agua potable de la ciudad de Lima, contando con un reservorio en la Laguna Yuracmayo, también abastece la actividad agrícola de varios ciudadanos de la zona. La cuenca se encuentra en la zona central del territorio peruano, en la vertiente del pacífico y flanco occidental de la cordillera de Los Andes.

Figura 23.

Figura de Mapa de vista de imagen satelital Sentinel 2B que muestra el área de estudio sobre un fondo de imagen satelital.

(siguiente página)

3.9.1.3 Límites y altitud

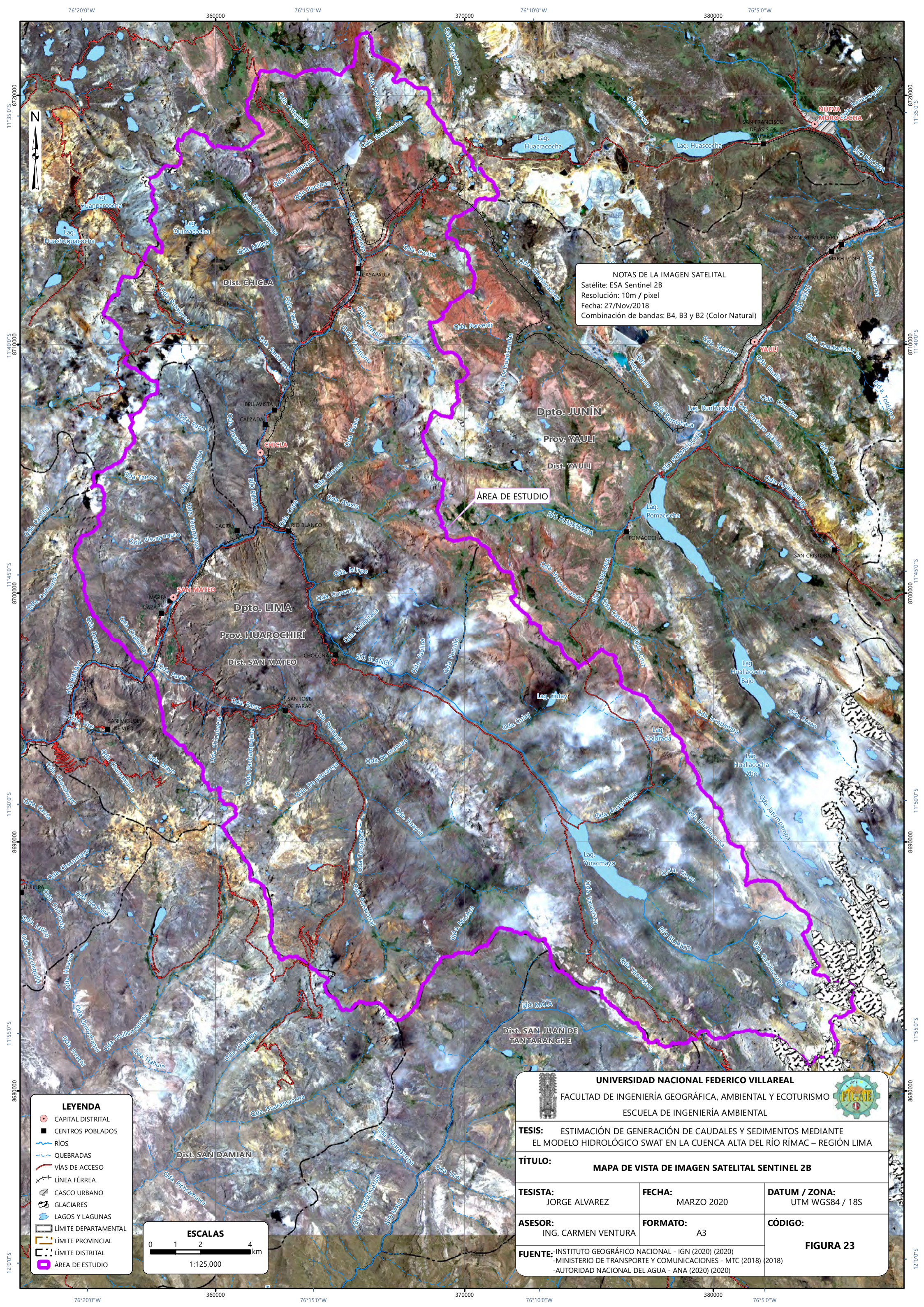
Políticamente el área de estudio limita al sur con los distritos de Huarochirí, San Juan De Tantarache y San Lorenzo De Quinti de la provincia de Huarochirí; al norte con los distritos de Marcapomacocha y Morococha de la provincia de Yauli; al este con los distritos de Morococha, Yauli y Suitucanacha de la provincia de Yauli; y al oeste con los distritos de Carampoma, San Mateo y San Damian de la provincia de Huarochirí.

Hidrológicamente el área de estudio limita al sur con la cuenca Mala, al norte y este con la cuenca Mantaro y al oeste con las cuencas de Rímac y Lurín.

El área de estudio presenta una altitud media de 4619 msnm, siendo 2940 msnm y 5606 msnm la altitud mínima y máxima respectivamente.

Figura 24.

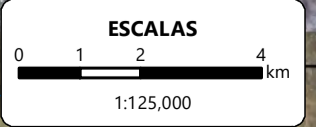
Perfil longitudinal del área de estudio



NOTAS DE LA IMAGEN SATELITAL
 Satélite: ESA Sentinel 2B
 Resolución: 10m / pixel
 Fecha: 27/Nov/2018
 Combinación de bandas: B4, B3 y B2 (Color Natural)

ÁREA DE ESTUDIO

- LEYENDA**
- CAPITAL DISTRITAL
 - CENTROS POBLADOS
 - RÍOS
 - QUEBRADAS
 - VÍAS DE ACCESO
 - LÍNEA FÉRREA
 - CASCO URBANO
 - GLACIARES
 - LAGOS Y LAGUNAS
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



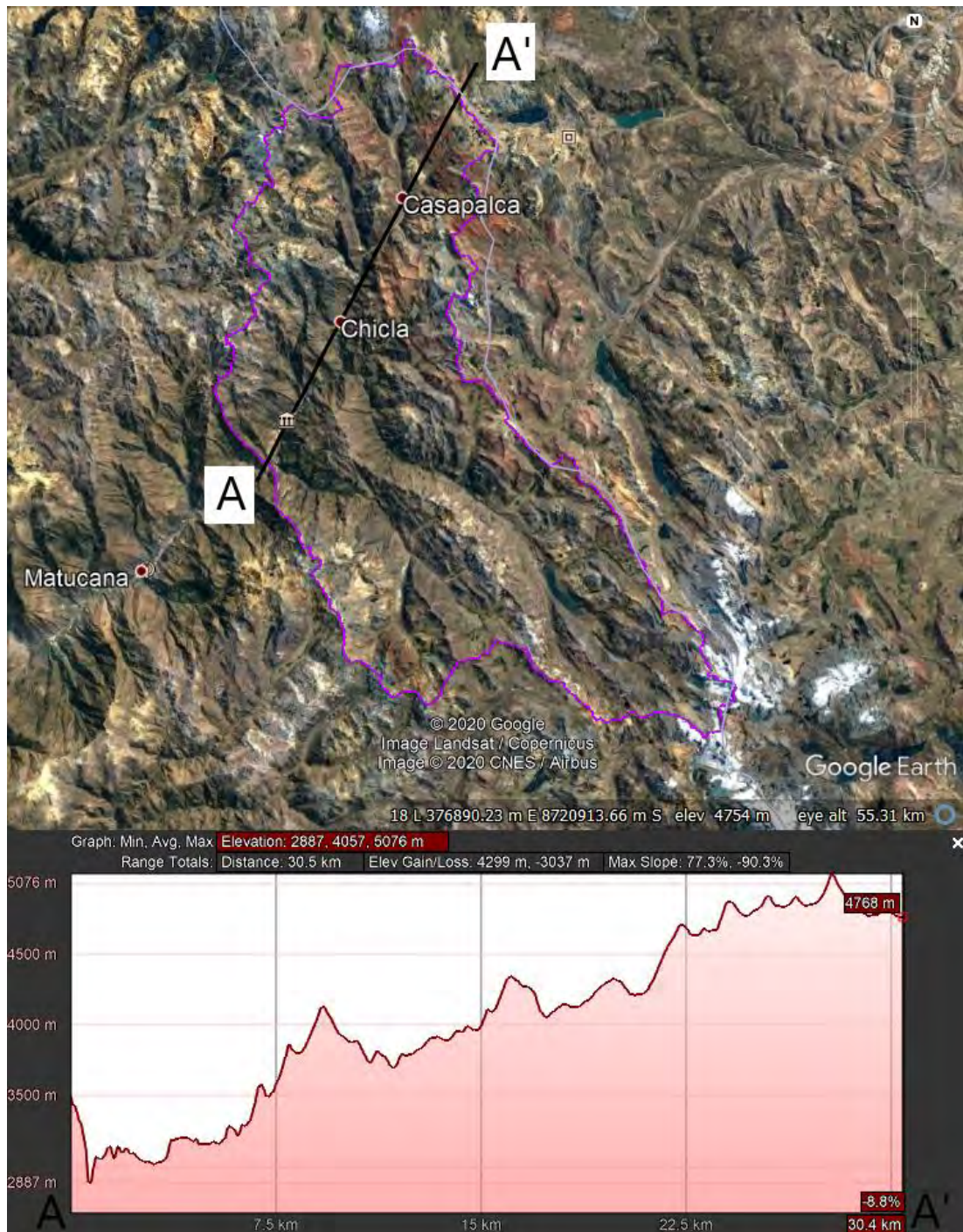
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE VISTA DE IMAGEN SATELITAL SENTINEL 2B

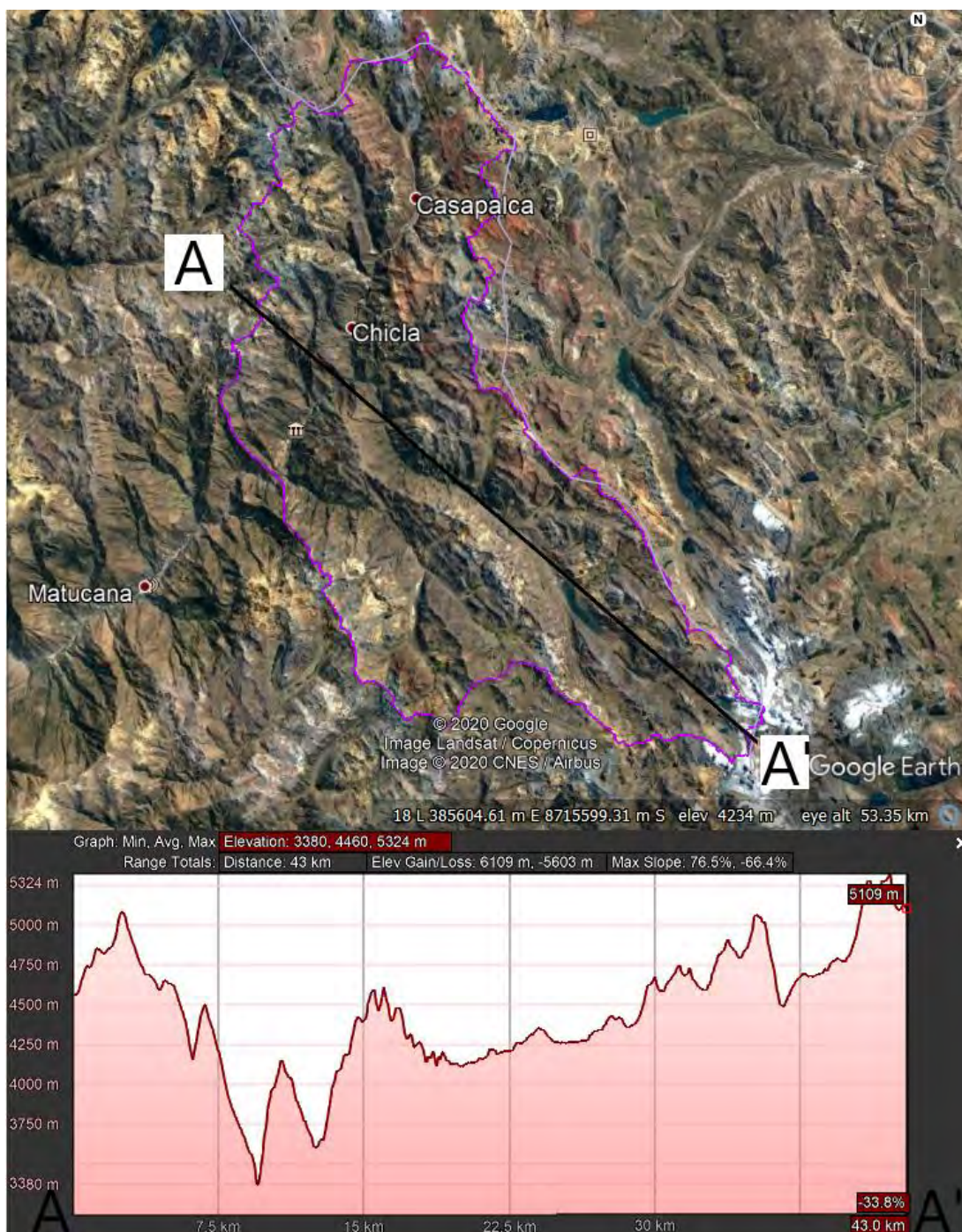
TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 23

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020) (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018) (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020) (2020)



Nota. Adaptado de Google Earth, 2020.

Figura 25.
 Perfil transversal del área de estudio



Nota. Adaptado de Google Earth, 2020.

3.9.1.4 Vías de acceso y comunicaciones

Se llega al área de estudio desde la ciudad capital de Lima

por vía terrestre y férrea, por la carretera central en la primera vía, y por el ferrocarril central por la segunda. Desde las ciudades de La Oroya, Jauja y Huancayo por medio de la carretera central. El área de estudio no cuenta con aeropuerto comercial.

Figura 26.

Figura de Mapa de vías de acceso que muestra cómo llegar al área de estudio desde la ciudad capital de Lima.

(siguiente página)

3.9.2 Diagnóstico Físico

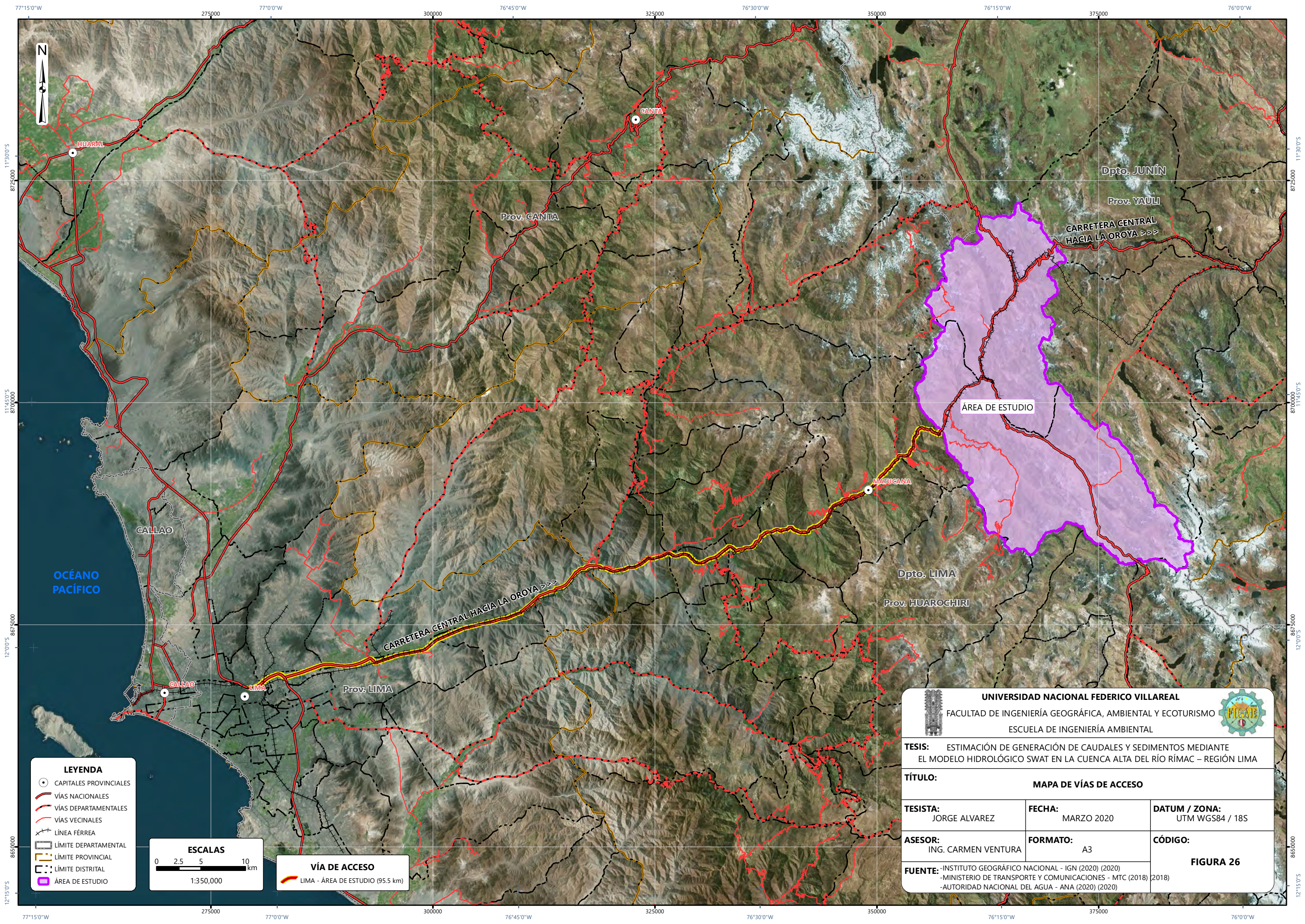
3.9.2.1 Geología.

En el área de estudio se ubican las unidades estratigráficas de Depósito aluvial, Depósitos fluvioglaciares, Depósitos glaciares, Volc. Pacococha, Fm. Huarochiri, Volc. Millotingo, Gpo. Rímac, Fm. Bellavista Rio Blanco, Fm. Carlos Francisco, Fm. Casapalca, Fm. Jumasha, Fm. Pariatambo; así como las rocas intrusivas de Monzonita Granodiorita, Diorita y Riodacita.

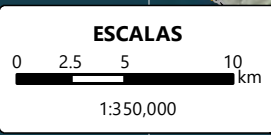
Tabla 20.

Geología regional

ERA	SISTEMA		UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS			
			SECTOR OCCIDENTAL		SECTOR ORIENTAL	
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE	Q-al	Depósitos aluviales		
		PLEHISTOCENO	Q-fg	Depósitos fluvioglaciares		
			Q-g	Depósitos glaciares		
	TERCIARIO	SUPERIOR	Ts-p	Volc. Pacococha	Ts-p	Volc. Pacococha
			Ts-hu	Fm. Huarochiri		
		MEDIO	Tm-m	Volc. Millotingo	Tm-m	Volc. Millotingo
		INFERIOR	Tim-r	Gpo. Rímac	Tim-bvrb	Fm. Bellavista Rio Blanco
					Tim-cf	Fm. Carlos Francisco
MESOZOICO	CRETACEO	SUPERIOR			Kti-c	Fm. Casapalca
			Ks-j	Fm. Jumasha	Ks-j	Fm. Jumasha
		INFERIOR	Ki-pa	Fm. Pariatambo	Ki-pa	Fm. Pariatambo



- LEYENDA**
- CAPITALS PROVINCIALES
 - VÍAS NACIONALES
 - VÍAS DEPARTAMENTALES
 - VÍAS VECINALES
 - LÍNEA FÉRREA
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



VÍA DE ACCESO
 LIMA - ÁREA DE ESTUDIO (95.5 km)

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE VÍAS DE ACCESO

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 26

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020) (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018) (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020) (2020)

ERA	ROCAS INTRUSIVAS			
	PLUTÓNICAS		HIPABISALES	
CENOZOICO				
	T-mz/gd	Monzonita Granodiorita		
	T-di	Diorita	T-rda	Riodacita
MESOZOICO				

Nota. Adaptado de INGEMMET, 2020.

Figura 27.

Figura de Mapa de geología regional que muestra las categorías de geología regional en el área de estudio.

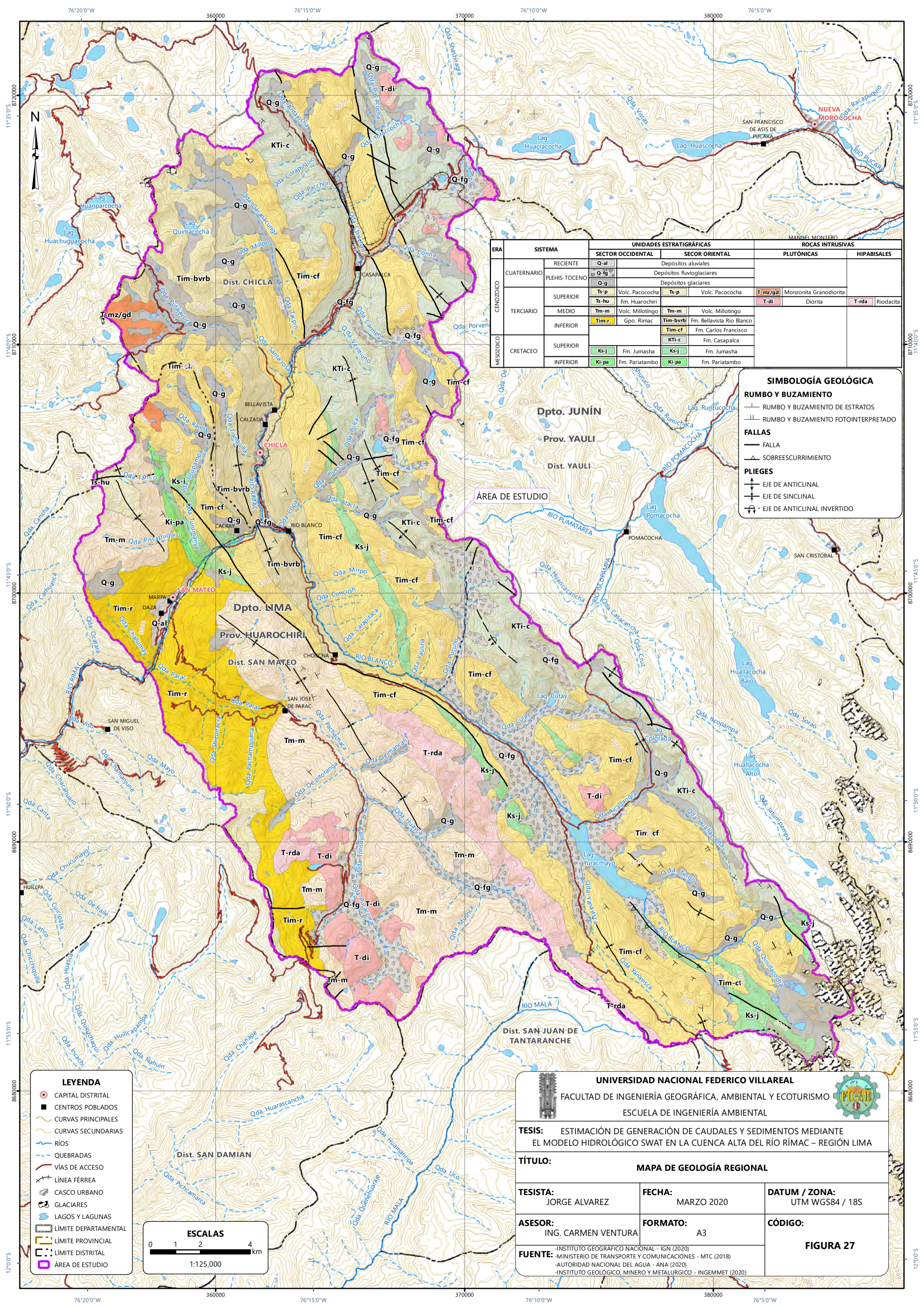
(siguiente página)

3.9.2.2 Fisiografía, topografía y pendientes.

Se presentan las siguientes formas de relieve en el área de estudio: Planicie Ondulada a Disectada - Altiplanicie disectada, Planicie - Fondo de valle glaciar, Colina y Montaña - Vertiente montañosa y colina moderadamente empinada, Colina y Montaña - Vertiente montañosa y colina empinada a escarpada, Montaña - Vertiente montañosa moderadamente empinada, Montaña - Vertiente montañosa empinada a escarpada.

Tabla 21.
Fisiografía

FORMAS DEL RELIEVE	REGIÓN
Planicie Ondulada a Disectada - Altiplanicie disectada	SIERRA - Zona Altoandina
Planicie - Fondo de valle glaciar	
Colina y Montaña - Vertiente montañosa y colina moderadamente empinada	



ERA	SISTEMA	UNIDADES ESTRATIGRAFICAS		ROCAS INTRUSIVAS	
		SECTOR OCCIDENTAL	SECTOR ORIENTAL	PLUTONICAS	HIPABISALES
CUATERNARIO	RECIENTE	Q-al	Depósitos aluviales		
	PLEHIS-TOCENO	Q-fg	Depósitos fluvio-glaciares		
		Q-g	Depósitos glaciares		
		Q-g			
CENOZOICO	SUPERIOR	Ts-p	Volc. Pacococha	T-mz/gd	Monzonita Granodiorita
		Ts-hu	Fm. Huarochiri	T-di	Diorita
	MEDIO	Tm-m	Volc. Millotingo	Tm-m	Volc. Millotingo
		Tim-r	Gpo. Rimac	Tim-bvrb	Fm. Bellavista Rio Blanco
INFERIOR			Tim-cf	Fm. Carlos Francisco	
			KTI-c	Fm. Casapalca	
CRETACEO	SUPERIOR	Ks-j	Fm. Jumasha	Ks-j	Fm. Jumasha
	INFERIOR	Ki-pa	Fm. Pariatambo	Ki-pa	Fm. Pariatambo

SIMBOLOGÍA GEOLÓGICA

RUMBO Y BUZAMIENTO

- RUMBO Y BUZAMIENTO DE ESTRATOS
- RUMBO Y BUZAMIENTO FOTOINTERPRETADO

FALLAS

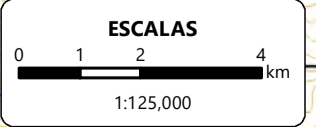
- FALLA
- △ SOBRESCURRIMIENTO

PLIEGES

- ↑ EJE DE ANTICLINAL
- ↓ EJE DE SINCLINAL
- ↕ EJE DE ANTICLINAL INVERTIDO

LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CENTROS POBLADOS
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE GEOLOGÍA REGIONAL

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO:

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
 -INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO - INGEMMET (2020)

FIGURA 27

Colina y Montaña - Vertiente montañosa y colina empinada a escarpada	
Montaña - Vertiente montañosa moderadamente empinada	SIERRA - Zona Mesoandina
Montaña - Vertiente montañosa empinada a escarpada	

Nota. Adaptado de ONERN, 1976.

Figura 28.

Figura de Mapa de fisiografía que muestra las categorías fisiográficas en el área de estudio.

(siguiente página)

En lo que respecta a topografía la altitud mínima es de 2940 msnm, la máxima de 5606 msnm y la media de 4619 msnm

Figura 29.

Figura de Mapa de topografía que muestra la topografía del área de estudio a partir del DEM Alos Palsar.

(siguiente página)

Se dividió el área de estudio en cinco categorías de pendientes las cuales se usó directamente en el modelo SWAT.

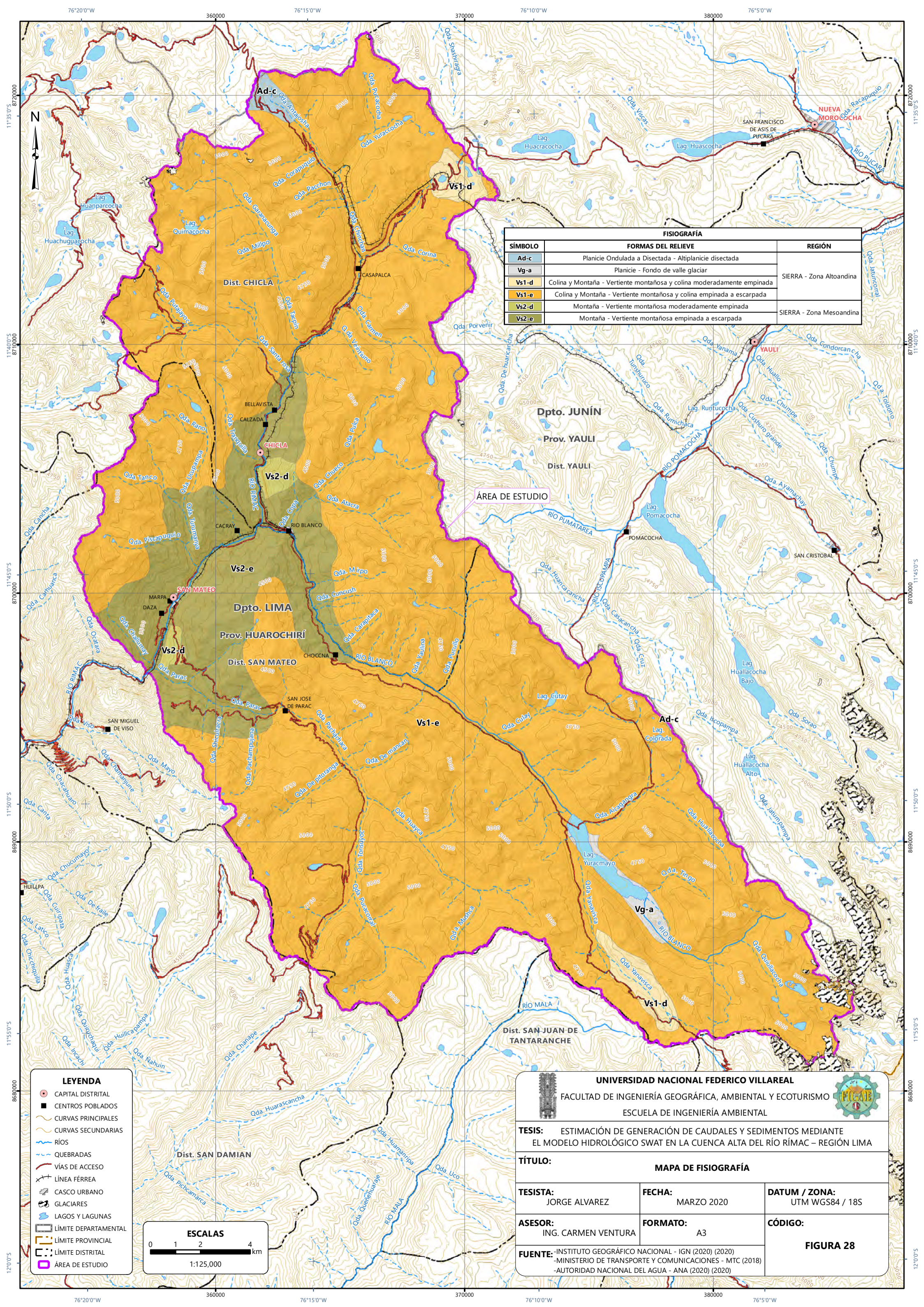
Tabla 22.

Pendientes

PENDIENTES	PROPORCIÓN
< 12%	5.20%
12% - 25%	12.50%
25% - 50%	35.10%
50% - 75%	29.30%
> 75%	17.80%

Figura 30.

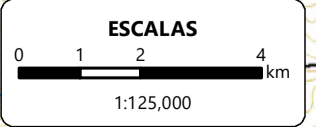
Vista tridimensional del área de estudio



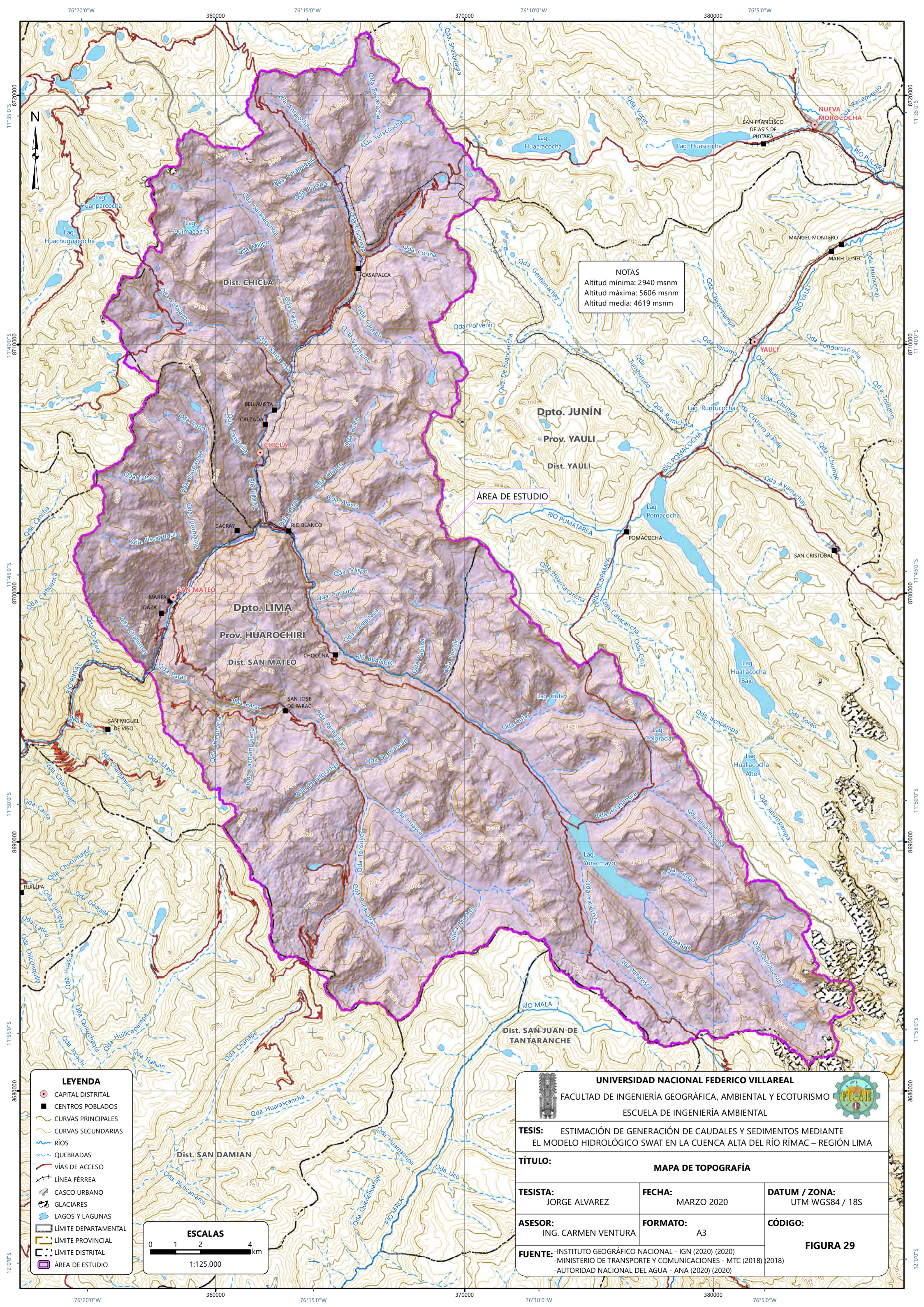
FISIOGRAFÍA		
SÍMBOLO	FORMAS DEL RELIEVE	REGIÓN
Ad-c	Planicie Ondulada a Disectada - Altiplanic disectada	SIERRA - Zona Altoandina
Vg-a	Planicie - Fondo de valle glaciar	
Vs1-d	Colina y Montaña - Vertiente montañosa y colina moderadamente empinada	SIERRA - Zona Mesoandina
Vs1-e	Colina y Montaña - Vertiente montañosa y colina empinada a escarpada	
Vs2-d	Montaña - Vertiente montañosa moderadamente empinada	
Vs2-e	Montaña - Vertiente montañosa empinada a escarpada	

ÁREA DE ESTUDIO

LEYENDA	
	CAPITAL DISTRITAL
	CENTROS POBLADOS
	CURVAS PRINCIPALES
	CURVAS SECUNDARIAS
	RÍOS
	QUEBRADAS
	VÍAS DE ACCESO
	LÍNEA FÉRREA
	CASCO URBANO
	GLACIARES
	LAGOS Y LAGUNAS
	LÍMITE DEPARTAMENTAL
	LÍMITE PROVINCIAL
	LÍMITE DISTRITAL
	ÁREA DE ESTUDIO



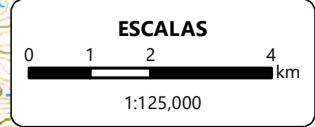
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL		
TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA		
TÍTULO: MAPA DE FISIOGRAFÍA		
TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: <div style="text-align: center;">FIGURA 28</div>
FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020) (2020) -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018) -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020) (2020)		



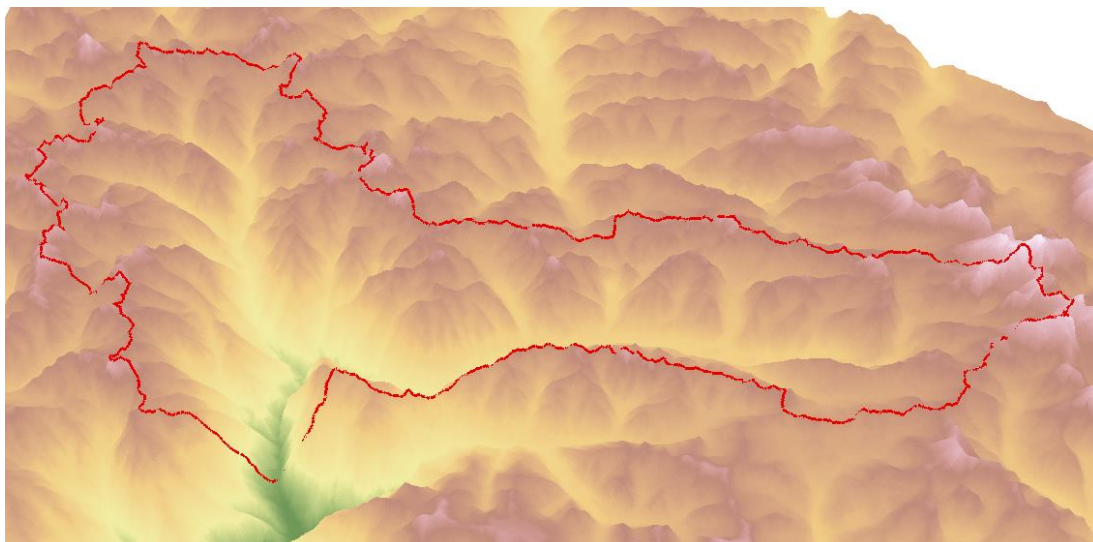
NOTAS
 Altitud mínima: 2940 msnm
 Altitud máxima: 5606 msnm
 Altitud media: 4619 msnm

ÁREA DE ESTUDIO

- LEYENDA**
- CAPITAL DISTRITAL
 - CENTROS POBLADOS
 - CURVAS PRINCIPALES
 - CURVAS SECUNDARIAS
 - RÍOS
 - QUEBRADAS
 - VÍAS DE ACCESO
 - LÍNEA FÉRREA
 - CASCO URBANO
 - GLACIARES
 - LAGOS Y LAGUNAS
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL		
TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA		
TÍTULO: MAPA DE TOPOGRAFÍA		
TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 29
FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020) (2020) -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018) (2018) -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020) (2020)		



Nota. Adaptado de Alos Palsar (2015).

Figura 31.

Figura de Mapa de pendientes que muestra ráster de pendientes en el área de estudio.

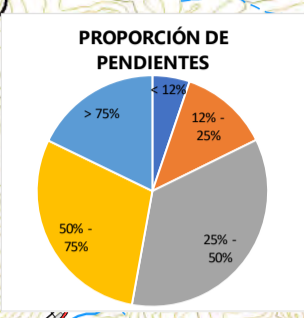
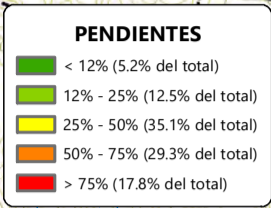
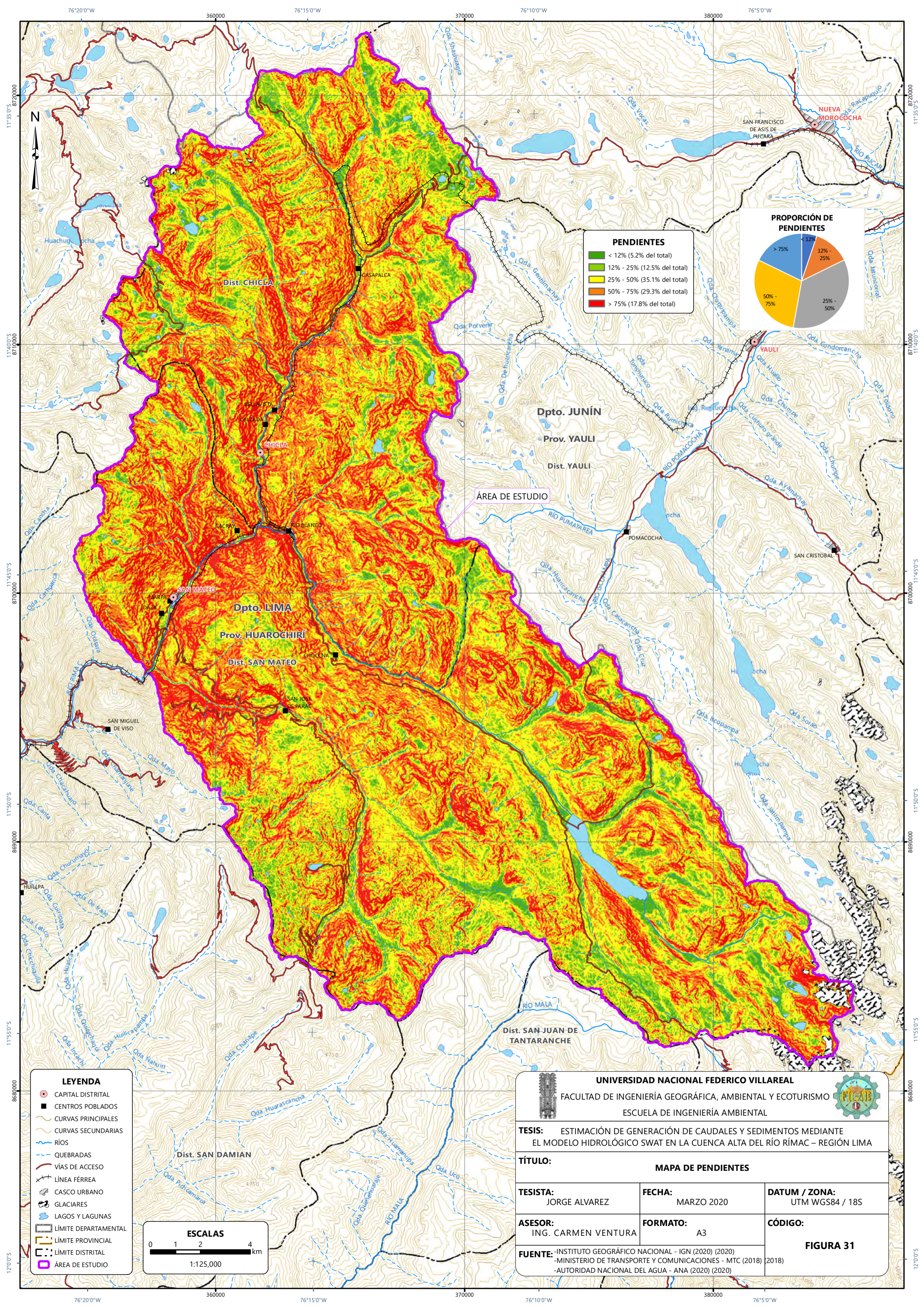
(siguiente página)

3.9.2.3 Geomorfología.

Las siguientes categorías son las que se encuentran en el área de estudio:

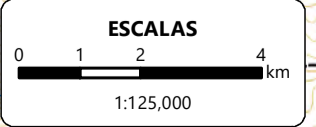
Tabla 23.
Geomorfología

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
Dan	Depósito antrópico
P-at	Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial
RC-ri	Colina en roca intrusiva
RC-rs	Colina en roca sedimentaria
RC-rv	Colina en roca volcánica
RCE-rs	Colina estructural en roca sedimentaria
RCL-ri	Colina y lomada en roca intrusiva
RCL-rv	Colina y lomada en roca volcánica
RCL-rvs	Colina y lomada en roca volcano-sedimentaria
RM-ri	Montaña en roca intrusiva
RM-rs	Montaña en roca sedimentaria
RM-rv	Montaña en roca volcánica



LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CENTROS POBLADOS
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE PENDIENTES

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO:

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020) (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018) (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020) (2020)

FIGURA 31

RM-rvs	Montaña en roca volcano-sedimentaria
RMC-rs	Montañas y colinas en roca sedimentaria
RMCE-rs	Montañas y colinas estructurales en roca sedimentaria
RME-rs	Montaña estructural en roca sedimentaria
Ti	Terraza indiferenciada
V-cd	Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial
V-d	Vertiente coluvial de detritos
VII-gl	Valle glaciar

Nota. Adaptado de IGN, 2020.

Figura 32.

Figura de Mapa de geomorfología que muestra las categorías geomorfológicas en el área de estudio.

(siguiente página)

3.9.2.4 Suelos.

Se tiene la siguiente clasificación de suelos, estos obedecen a la necesidad de SWAT de tener obligatoriamente una amplia gama de parámetros para correr el modelo.

Tabla 24.

Suelos

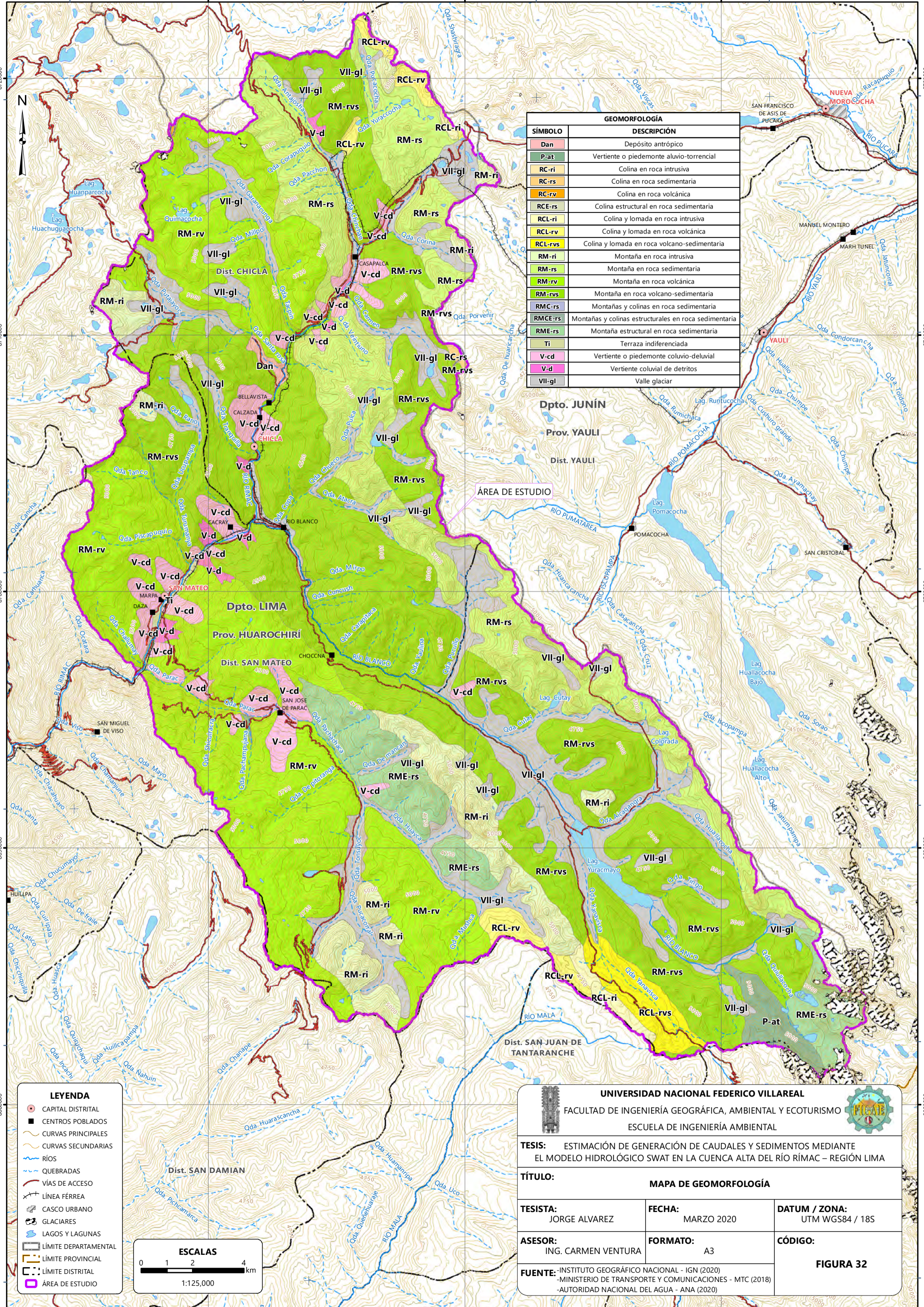
Unidades de Suelos	
I-BH-TV-C-5518	Litosol - Cambisol húmico - Andosol vítrico - fuertemente socavado a montañoso
I-KL-C-5533	Litosol - Kastanozem lúvico - fuertemente socavado a montañoso
GLACIER-6998	Glaciar
WATER-6997	Cuerpos de agua

Nota. Adaptado de FAO, 1960-2020.

Figura 33.

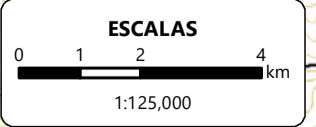
Figura de Mapa de suelos que muestra las categorías de suelos en el área de estudio, las cuales se obtuvieron del ráster de suelos Soil Map of the World (versión 3.6) 8800 metros/píxel (FAO/UNESO, 1971).

(siguiente página)



GEOMORFOLOGÍA	
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
Dan	Depósito antrópico
P-at	Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial
RC-ri	Colina en roca intrusiva
RC-rs	Colina en roca sedimentaria
RC-rv	Colina en roca volcánica
RCE-rs	Colina estructural en roca sedimentaria
RCL-ri	Colina y lomada en roca intrusiva
RCL-rv	Colina y lomada en roca volcánica
RCL-rvs	Colina y lomada en roca volcano-sedimentaria
RM-ri	Montaña en roca intrusiva
RM-rs	Montaña en roca sedimentaria
RM-rv	Montaña en roca volcánica
RM-rvs	Montaña en roca volcano-sedimentaria
RMC-rs	Montañas y colinas en roca sedimentaria
RMCE-rs	Montañas y colinas estructurales en roca sedimentaria
RME-rs	Montaña estructural en roca sedimentaria
Ti	Terraza indiferenciada
V-cd	Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial
V-d	Vertiente coluvial de detritos
VII-gl	Valle glaciar

LEYENDA	
	CAPITAL DISTRITAL
	CENTROS POBLADOS
	CURVAS PRINCIPALES
	CURVAS SECUNDARIAS
	RÍOS
	QUEBRADAS
	VÍAS DE ACCESO
	LÍNEA FÉRREA
	CASCO URBANO
	GLACIARES
	LAGOS Y LAGUNAS
	LÍMITE DEPARTAMENTAL
	LÍMITE PROVINCIAL
	LÍMITE DISTRITAL
	ÁREA DE ESTUDIO



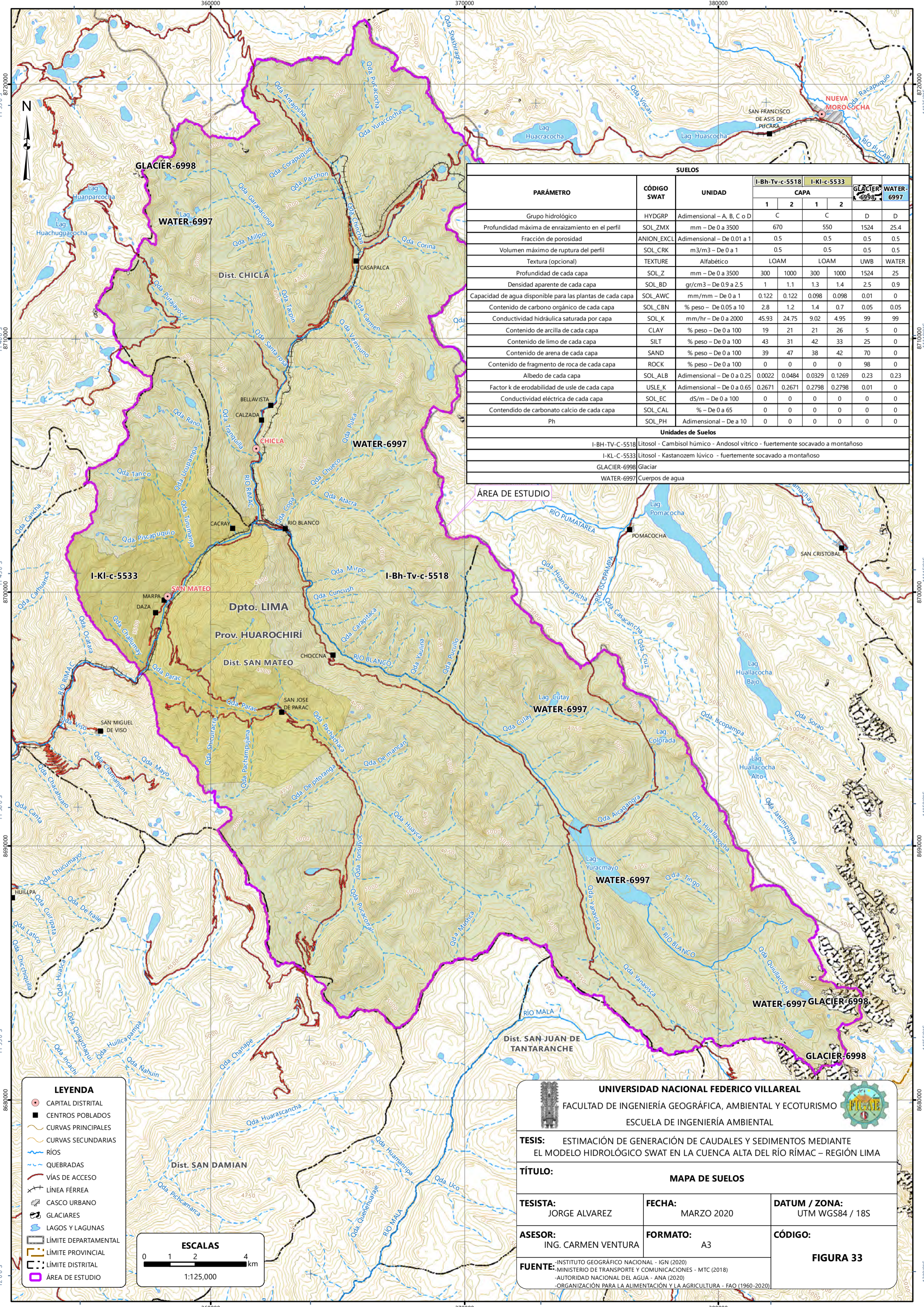
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE GEOMORFOLOGÍA

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 32

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)



PARÁMETRO	CÓDIGO SWAT	UNIDAD	SUELOS					
			I-Bh-Tv-c-5518				I-KI-c-5533	
			CAPA		CAPA		GLACIER-6998	WATER-6997
			1	2	1	2	D	D
Grupo hidrológico	HYDRP	Adimensional - A, B, C o D	C		C		D	D
Profundidad máxima de enraizamiento en el perfil	SOL_ZMX	mm - De 0 a 3500	670		550		1524	25.4
Fracción de porosidad	ANION_EXCL	Adimensional - De 0.01 a 1	0.5		0.5		0.5	0.5
Volumen máximo de ruptura del perfil	SOL_CRK	m ³ /m ³ - De 0 a 1	0.5		0.5		0.5	0.5
Textura (opcional)	TEXTURE	Alfabetico	LOAM		LOAM		UWB	WATER
Profundidad de cada capa	SOL_Z	mm - De 0 a 3500	300	1000	300	1000	1524	25
Densidad aparente de cada capa	SOL_BD	gr/cm ³ - De 0.9 a 2.5	1	1.1	1.3	1.4	2.5	0.9
Capacidad de agua disponible para las plantas de cada capa	SOL_AWC	mm/mm - De 0 a 1	0.122	0.122	0.098	0.098	0.01	0
Contenido de carbono orgánico de cada capa	SOL_CBN	% peso - De 0.05 a 10	2.8	1.2	1.4	0.7	0.05	0.05
Conductividad hidráulica saturada por capa	SOL_K	mm/hr - De 0 a 2000	45.93	24.75	9.02	4.95	99	99
Contenido de arcilla de cada capa	CLAY	% peso - De 0 a 100	19	21	21	26	5	0
Contenido de limo de cada capa	SILT	% peso - De 0 a 100	43	31	42	33	25	0
Contenido de arena de cada capa	SAND	% peso - De 0 a 100	39	47	38	42	70	0
Contenido de fragmento de roca de cada capa	ROCK	% peso - De 0 a 100	0	0	0	0	98	0
Albedo de cada capa	SOL_ALB	Adimensional - De 0 a 0.25	0.0022	0.0484	0.0329	0.1269	0.23	0.23
Factor k de erodabilidad de usle de cada capa	USLE_K	Adimensional - De 0 a 0.65	0.2671	0.2671	0.2798	0.2798	0.01	0
Conductividad eléctrica de cada capa	SOL_EC	dS/m - De 0 a 100	0	0	0	0	0	0
Contenido de carbonato calcio de cada capa	SOL_CAL	% - De 0 a 65	0	0	0	0	0	0
Ph	SOL_PH	Adimensional - De a 10	0	0	0	0	0	0

Unidades de Suelos

I-BH-TV-C-5518 Litosol - Cambisol húmico - Andosol vítrico - fuertemente socavado a montañoso

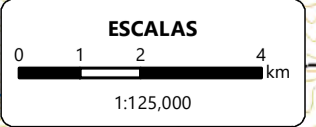
I-KI-C-5533 Litosol - Kastanozem lúvico - fuertemente socavado a montañoso

GLACIER-6998 Glaciar

WATER-6997 Cuerpos de agua

ÁREA DE ESTUDIO

- LEYENDA**
- CAPITAL DISTRITAL
 - CENTROS POBLADOS
 - CURVAS PRINCIPALES
 - CURVAS SECUNDARIAS
 - RÍOS
 - QUEBRADAS
 - VÍAS DE ACCESO
 - LÍNEA FÉRREA
 - CASCO URBANO
 - GLACIARES
 - LAGOS Y LAGUNAS
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC - REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE SUELOS

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 33

FUENTE:
 - INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 - MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 - AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
 - ORGANIZACIÓN PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA - FAO (1960-2020)

3.9.2.5 Uso actual de tierras.

La clasificación de Uso de Tierras (UAT) se basó en imágenes satelitales Sentinel 2B.

Se tienen las siguientes categorías en el área de estudio:

Tabla 25.

Uso Actual de Tierras (UAT)

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	(%)
Lagos, lagunas y nevados	-	9.2
Pantanos y ciénagas	Terrenos mal drenados	0.7
Praderas naturales	Terrenos con praderas naturales	7.5
Tierras boscosas	Terrenos con bosques; bosques húmedos y matorrales	37.7
Tierras de cultivos	Terrenos con vegetación cultivada	1.0
Tierras improductivas	Terrenos sin uso y/o improductivos	43.9

Nota. Adaptado de ESA, 2019.

Figura 34.

Figura de Mapa de uso actual de tierras que muestra las categorías de Uso Actual de Tierras (UAT) en el área de estudio.

(siguiente página)

3.9.2.6 Capacidad de uso mayor.

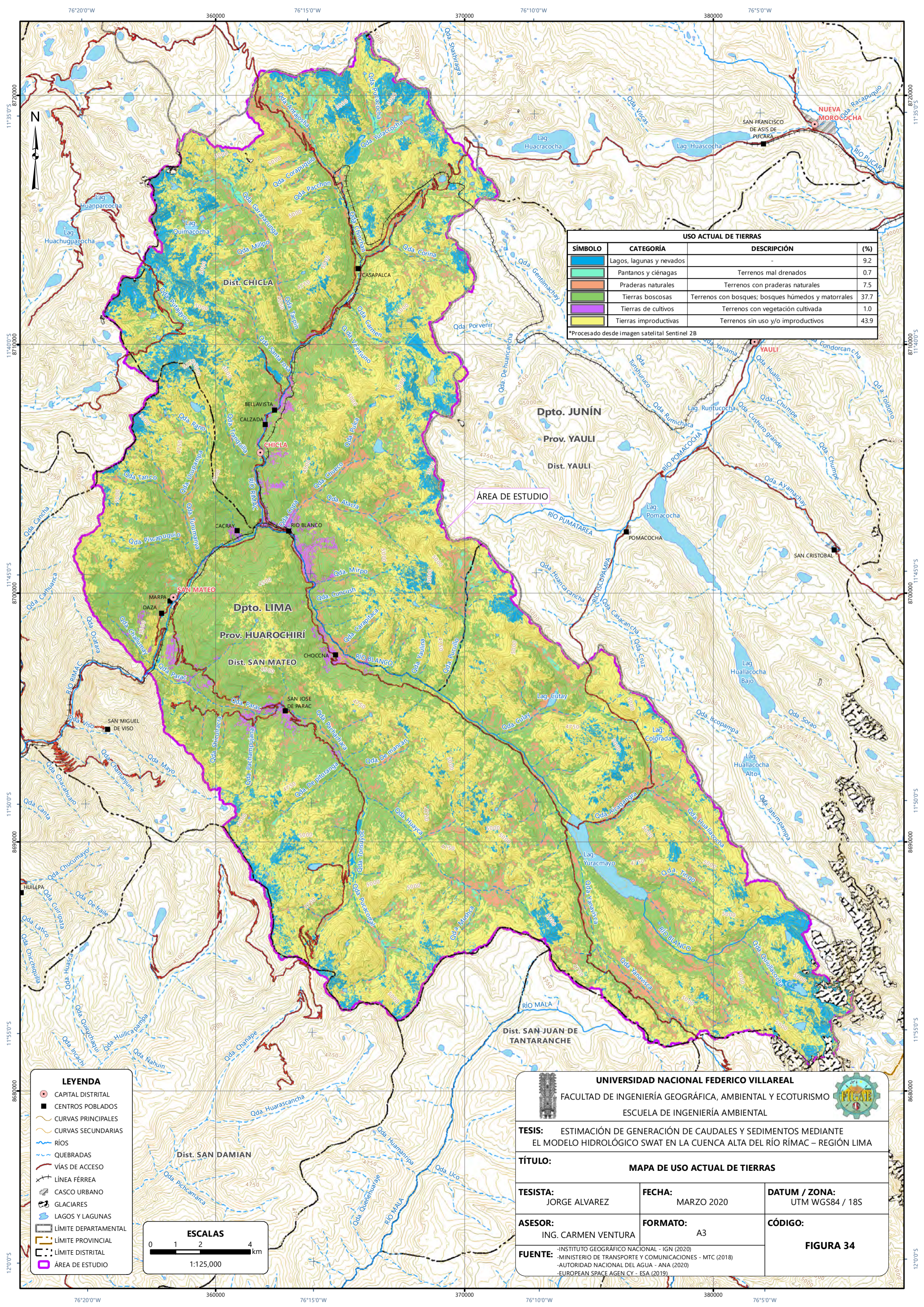
Según ONERN (1976) se presentan las siguientes categorías de Capacidad de Uso

Mayor para el área de estudio.

Tabla 26.

Capacidad de uso mayor

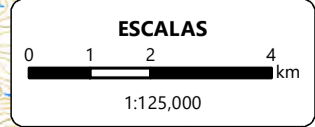
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
F3c - P2e - X	Tierra apta para producción forestal, limitación clima. Calidad agrológica baja - Tierras de Protección
X	Tierra de Protección
X - P2e	Asociación de protección de pastos. Limitada erosión. Calidad agrológica media



USO ACTUAL DE TIERRAS			
SÍMBOLO	CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	(%)
	Lagos, lagunas y nevados	-	9.2
	Pantanos y ciénagas	Terrenos mal drenados	0.7
	Praderas naturales	Terrenos con praderas naturales	7.5
	Tierras boscosas	Terrenos con bosques; bosques húmedos y matorrales	37.7
	Tierras de cultivos	Terrenos con vegetación cultivada	1.0
	Tierras improductivas	Terrenos sin uso y/o improductivos	43.9

*Procesado desde imagen satelital Sentinel 2B

LEYENDA	
	CAPITAL DISTRITAL
	CENTROS POBLADOS
	CURVAS PRINCIPALES
	CURVAS SECUNDARIAS
	RÍOS
	QUEBRADAS
	VÍAS DE ACCESO
	LÍNEA FÉRREA
	CASCO URBANO
	GLACIARES
	LAGOS Y LAGUNAS
	LÍMITE DEPARTAMENTAL
	LÍMITE PROVINCIAL
	LÍMITE DISTRITAL
	ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE USO ACTUAL DE TIERRAS

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 34

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
 -EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA (2019)

X - P2e - A2sc Asociación de protección de pastos, cultivo en limpio. Limitación suelo-clima. Calidad agrológica media

Nota. Adaptado de ONERN, 1976.

Figura 35.

Figura de Mapa de capacidad de uso mayor que muestra las categorías de Capacidad de Uso Mayor tierras (CUM) en el área de estudio.

(siguiente página)

3.9.2.7 Máximas intensidades sísmicas.

Se distribuyen las siguientes dos categorías de distribución de máximas intensidades sísmicas en la escala de Mercali: VI y VII (CISMID, 1984).

Figura 36.

Figura de Mapa de máximas intensidades sísmicas que muestra la distribución de máximas intensidades sísmicas en el área de estudio.

(siguiente página)

3.9.2.8 Climatología.

Se encuentran cuatro categorías según la clasificación climática de Thornthwaite en el área de estudio (SENAMHI, 2020)

Tabla 27.

Clasificación climática en el área de estudio según Thornthwaite

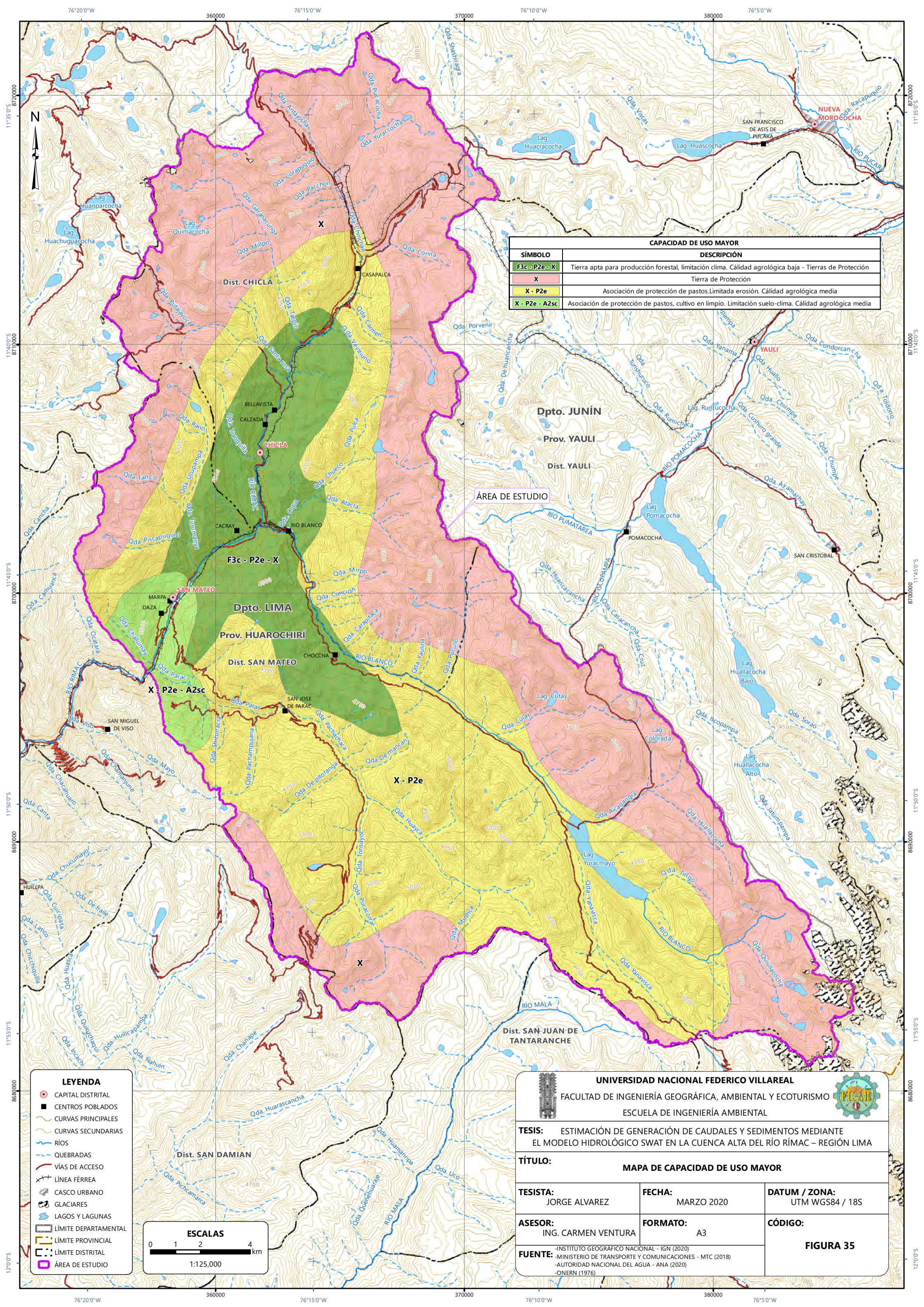
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
B(i) D' H3	Lluvioso (invierno seco) Semifrío Húmedo
C(o,i,p) B'2 H3	Semiseco (otoño seco, invierno seco, primavera seca) Templado Húmedo
C(o,i,p) B'3 H3	Semiseco (otoño seco, invierno seco, primavera seca) Semifrío Húmedo
N	Nieve

Nota. Obtenido de SENAMHI, 2020.

Figura 37.

Figura de Mapa de clasificación climática que muestra la distribución climática en el área de estudio.

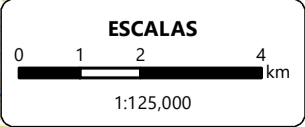
(siguiente página)



SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
F3c - P2e - X	Tierra apta para producción forestal, limitación clima. Calidad agrológica baja - Tierras de Protección
X	Tierra de Protección
X - P2e	Asociación de protección de pastos. Limitada erosión. Calidad agrológica media
X - P2e - A2sc	Asociación de protección de pastos, cultivo en limpio. Limitación suelo-clima. Calidad agrológica media

ÁREA DE ESTUDIO

LEYENDA	
	CAPITAL DISTRITAL
	CENTROS POBLADOS
	CURVAS PRINCIPALES
	CURVAS SECUNDARIAS
	RÍOS
	QUEBRADAS
	VÍAS DE ACCESO
	LÍNEA FÉRREA
	CASCO URBANO
	GLACIARES
	LAGOS Y LAGUNAS
	LÍMITE DEPARTAMENTAL
	LÍMITE PROVINCIAL
	LÍMITE DISTRITAL
	ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

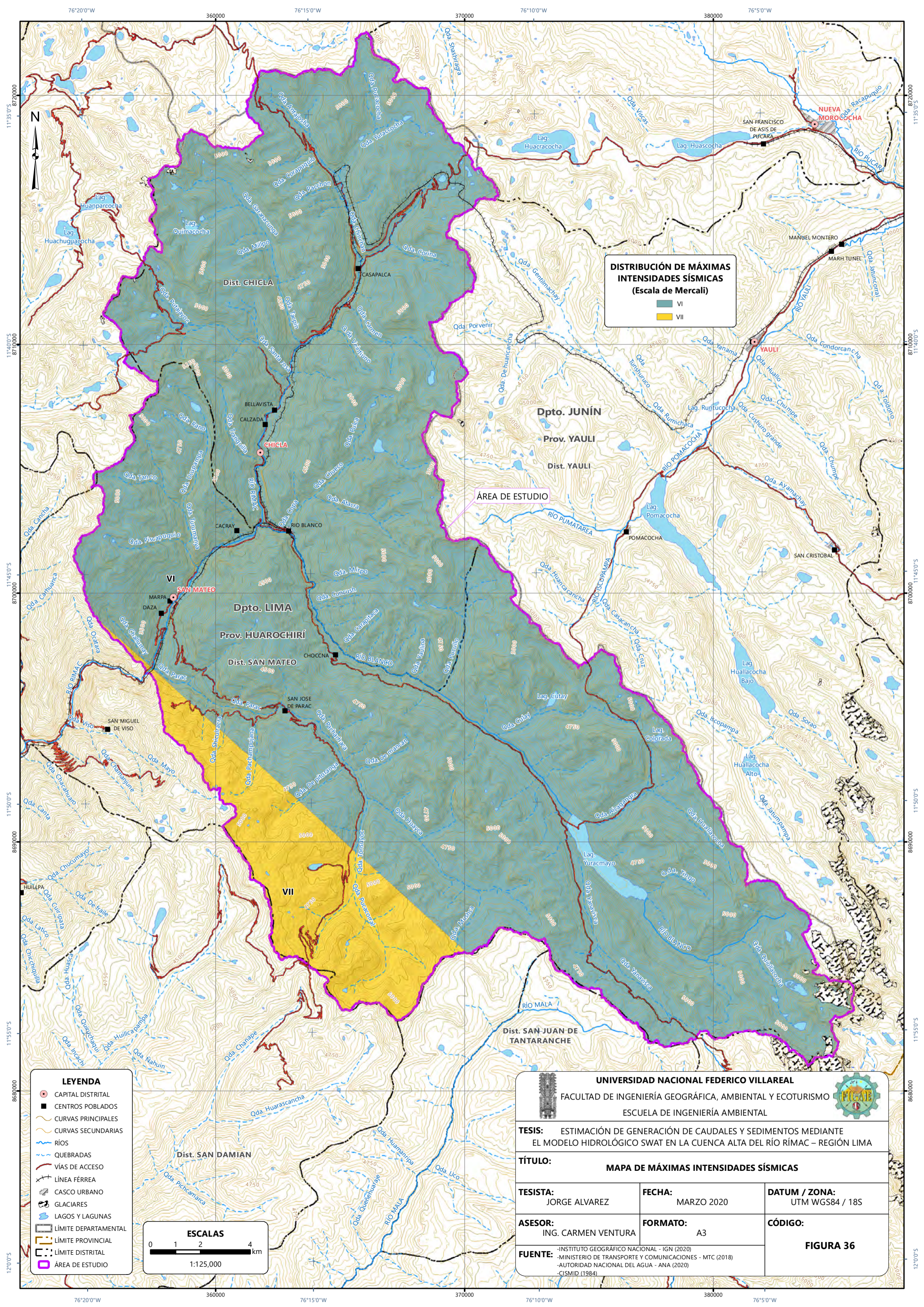
TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE CAPACIDAD DE USO MAYOR

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO:

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
 -ONERN (1976)

FIGURA 35

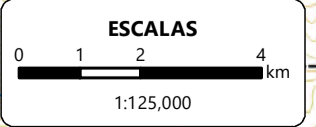


DISTRIBUCIÓN DE MÁXIMAS INTENSIDADES SÍSMICAS (Escala de Mercalli)

- VI
- VII

ÁREA DE ESTUDIO

- LEYENDA**
- CAPITAL DISTRITAL
 - CENTROS POBLADOS
 - CURVAS PRINCIPALES
 - CURVAS SECUNDARIAS
 - RÍOS
 - QUEBRADAS
 - VÍAS DE ACCESO
 - LÍNEA FÉRREA
 - CASCO URBANO
 - GLACIARES
 - LAGOS Y LAGUNAS
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

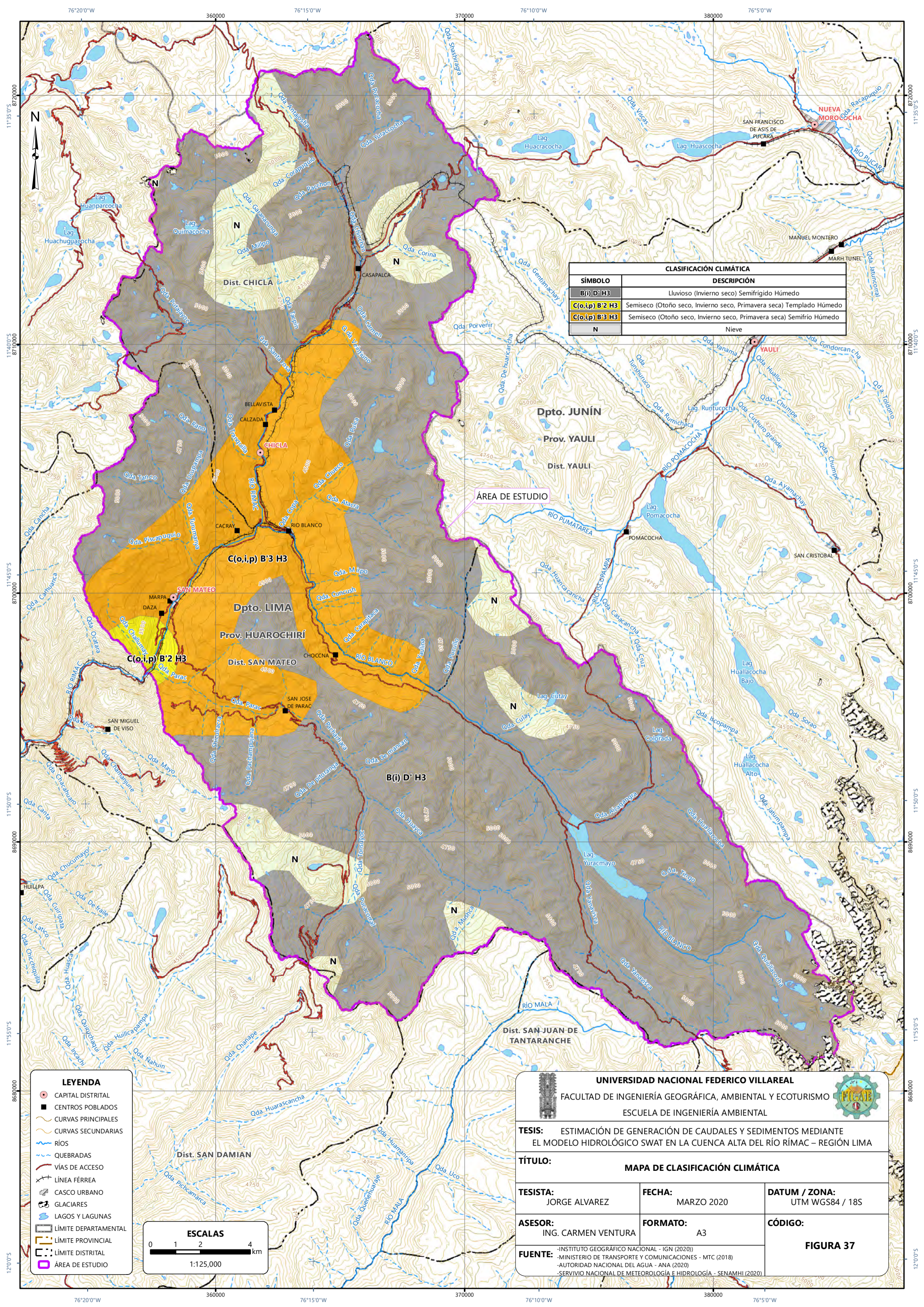
TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE MÁXIMAS INTENSIDADES SÍSMICAS

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO:

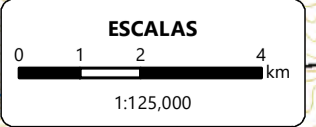
FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
 -CISMID (1984)

FIGURA 36



CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA	
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
B(i) D' H3	Lluvioso (Invierno seco) Semifrío Húmedo
C(o,i,p) B'2 H3	Semiseco (Otoño seco, Invierno seco, Primavera seca) Templado Húmedo
C(o,i,p) B'3 H3	Semiseco (Otoño seco, Invierno seco, Primavera seca) Semifrío Húmedo
N	Nieve

LEYENDA	
	CAPITAL DISTRITAL
	CENTROS POBLADOS
	CURVAS PRINCIPALES
	CURVAS SECUNDARIAS
	RÍOS
	QUEBRADAS
	VÍAS DE ACCESO
	LÍNEA FÉRREA
	CASCO URBANO
	GLACIARES
	LAGOS Y LAGUNAS
	LÍMITE DEPARTAMENTAL
	LÍMITE PROVINCIAL
	LÍMITE DISTRITAL
	ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 37

FUENTE:
 -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
 -SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA - SENAMHI (2020)

3.9.2.9 Hidrografía y parámetros geomorfológicos.

En la sección 4.2.3 “Variables de entrada meteorológicas” se desarrolla las estaciones hidrométricas y meteorológicas (PISCO) utilizadas en la corrida del modelo. Así como la distribución de temperatura (isotermas) y precipitación (isoyetas) en el área de estudio calculados con dichas estaciones.

Figura 38.

Figura de Mapa de estaciones meteorológicas e hidrométricas que muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el presente estudio.

(siguiente página)

Figura 39.

Figura de Mapa de isotermas máxima media anual que muestra la distribución de temperatura máxima media anual en el área de estudio.

(siguiente página)

Figura 40.

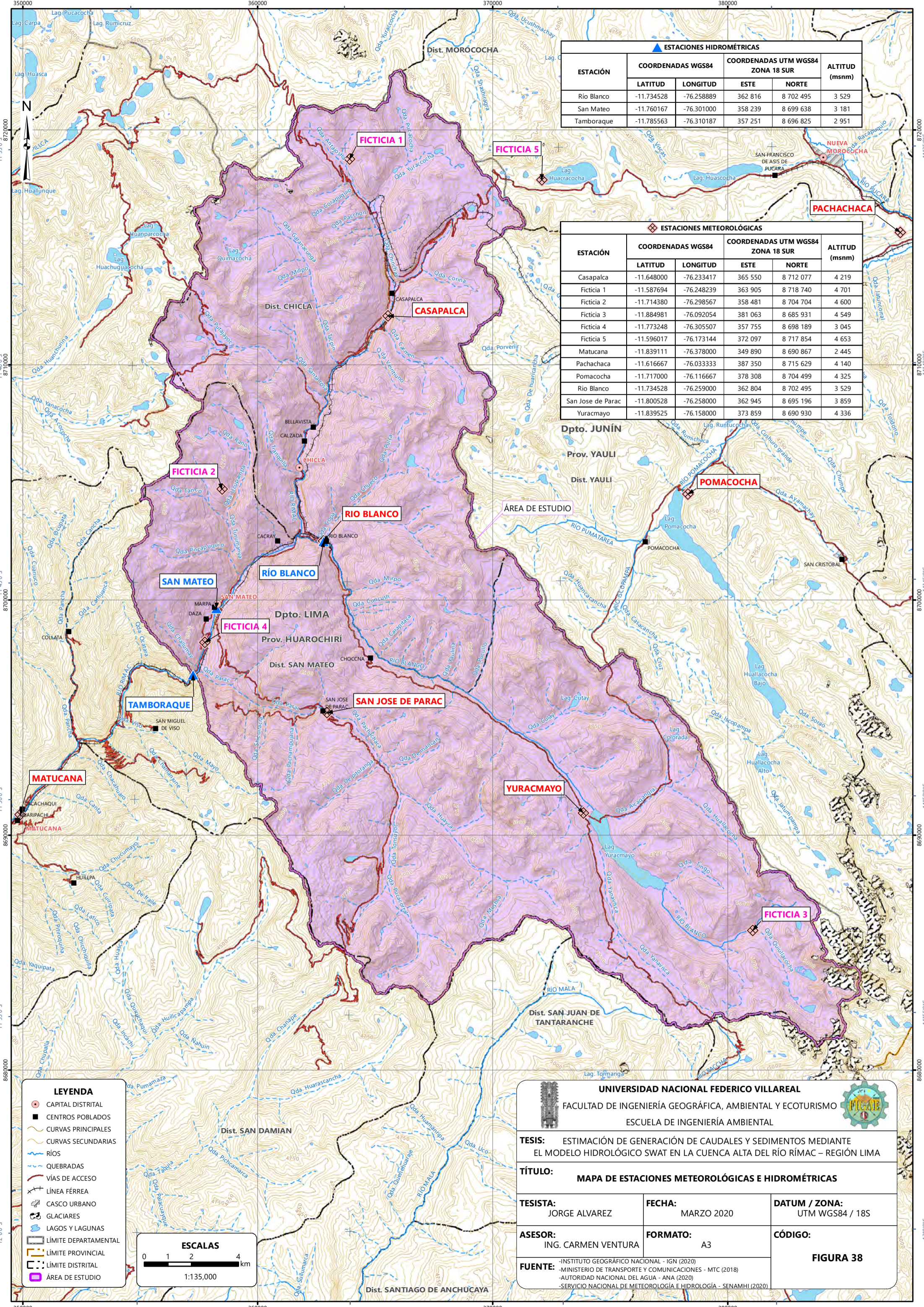
Figura de Mapa de isotermas mínima media anual que Muestra la distribución de temperatura mínima media anual en el área de estudio.

(siguiente página)

Figura 41.

Figura de Mapa de isoyetas media anual que muestra la distribución de precipitación media anual en el área de estudio.

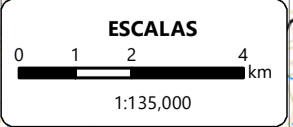
(siguiente página)



ESTACIONES HIDROMÉTRICAS					
ESTACIÓN	COORDENADAS WGS84		COORDENADAS UTM WGS84 ZONA 18 SUR		ALTITUD (msnm)
	LATITUD	LONGITUD	ESTE	NORTE	
Río Blanco	-11.734528	-76.258889	362 816	8 702 495	3 529
San Mateo	-11.760167	-76.301000	358 239	8 699 638	3 181
Tamboraque	-11.785563	-76.310187	357 251	8 696 825	2 951

ESTACIONES METEOROLÓGICAS					
ESTACIÓN	COORDENADAS WGS84		COORDENADAS UTM WGS84 ZONA 18 SUR		ALTITUD (msnm)
	LATITUD	LONGITUD	ESTE	NORTE	
Casapalca	-11.648000	-76.233417	365 550	8 712 077	4 219
Ficticia 1	-11.587694	-76.248239	363 905	8 718 740	4 701
Ficticia 2	-11.714380	-76.298567	358 481	8 704 704	4 600
Ficticia 3	-11.884981	-76.092054	381 063	8 685 931	4 549
Ficticia 4	-11.773248	-76.305507	357 755	8 698 189	3 045
Ficticia 5	-11.596017	-76.173144	372 097	8 717 854	4 653
Matucana	-11.839111	-76.378000	349 890	8 690 867	2 445
Pachachaca	-11.616667	-76.033333	387 350	8 715 629	4 140
Pomacocha	-11.717000	-76.116667	378 308	8 704 499	4 325
Río Blanco	-11.734528	-76.259000	362 804	8 702 495	3 529
San Jose de Parac	-11.800528	-76.258000	362 945	8 695 196	3 859
Yuracmayo	-11.839525	-76.158000	373 859	8 690 930	4 336

- LEYENDA**
- CAPITAL DISTRITAL
 - CENTROS POBLADOS
 - CURVAS PRINCIPALES
 - CURVAS SECUNDARIAS
 - RÍOS
 - QUEBRADAS
 - VÍAS DE ACCESO
 - LÍNEA FÉRREA
 - CASCO URBANO
 - GLACIARES
 - LAGOS Y LAGUNAS
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



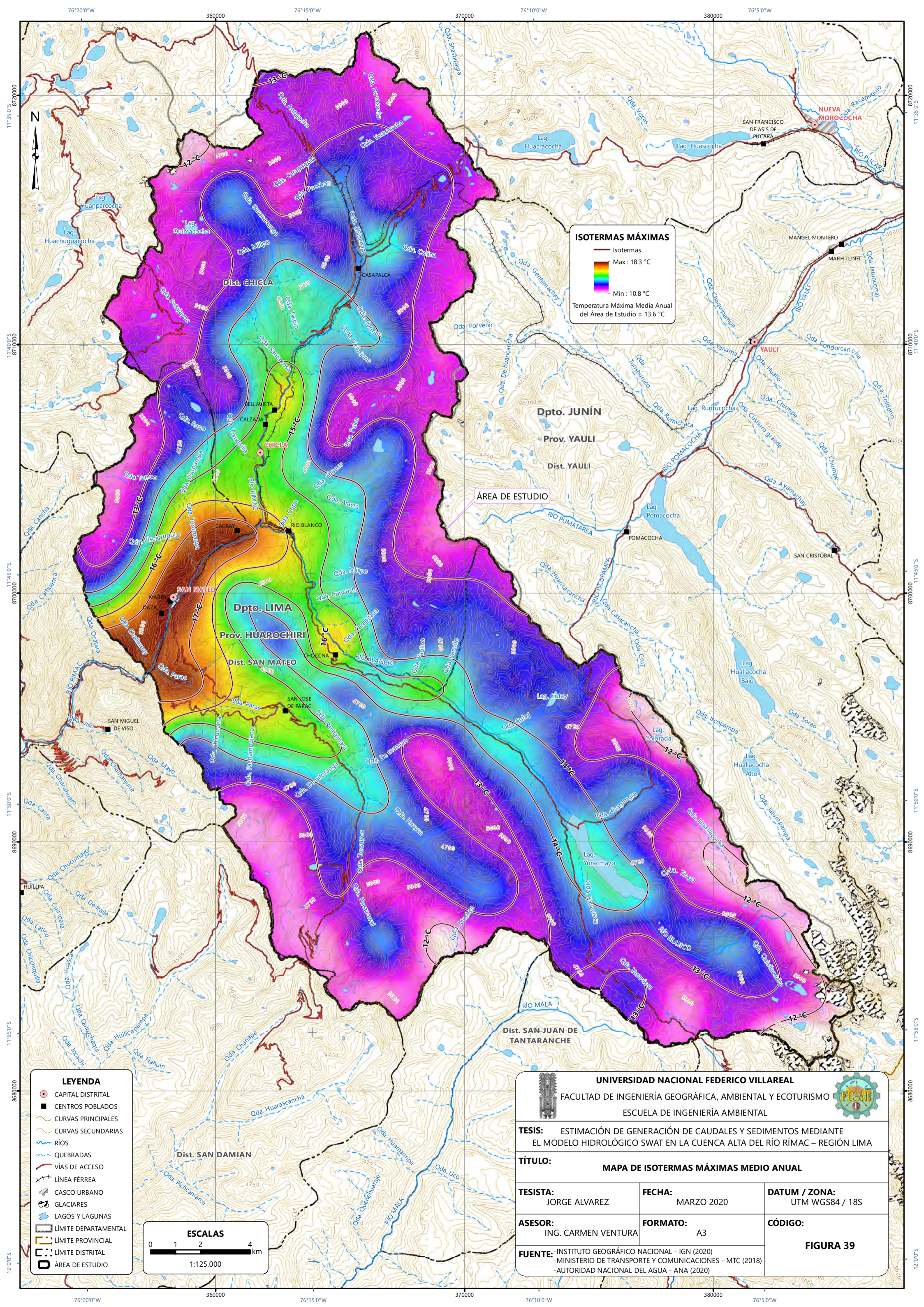
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 38

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
 -SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA - SENAMHI (2020)



ISOTERMAS MÁXIMAS

— Isotermas

Max : 18.3 °C

Min : 10.8 °C

Temperatura Máxima Media Anual del Área de Estudio = 13.6 °C

ÁREA DE ESTUDIO

LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CENTROS POBLADOS
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO

ESCALAS

0 1 2 4 km

1:125,000

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

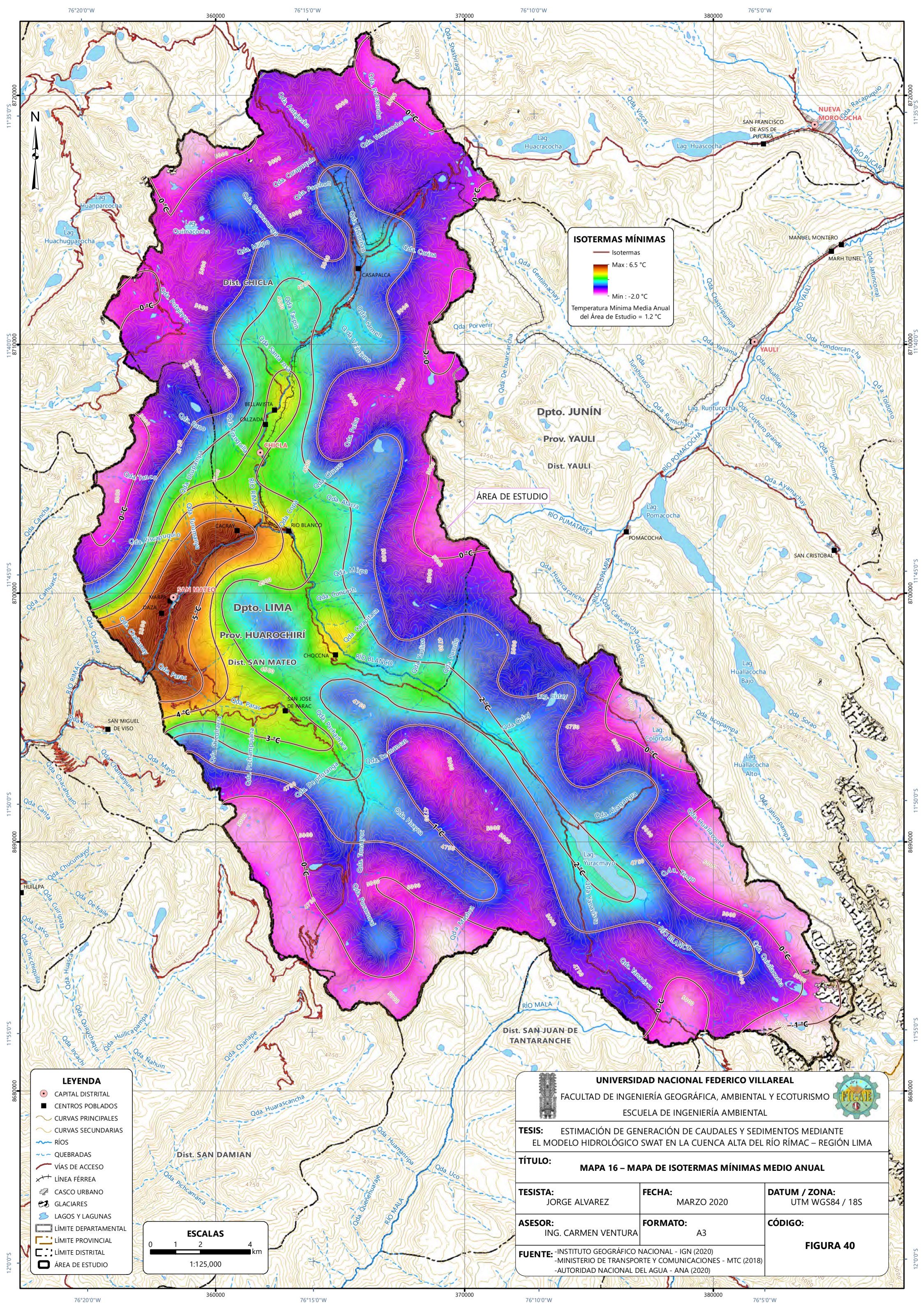
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE ISOTERMAS MÁXIMAS MEDIO ANUAL

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 39

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
-MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
-AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)



ISOTERMAS MÍNIMAS

— Isotermas

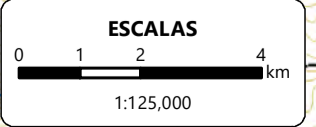
Max : 6.5 °C

Min : -2.0 °C

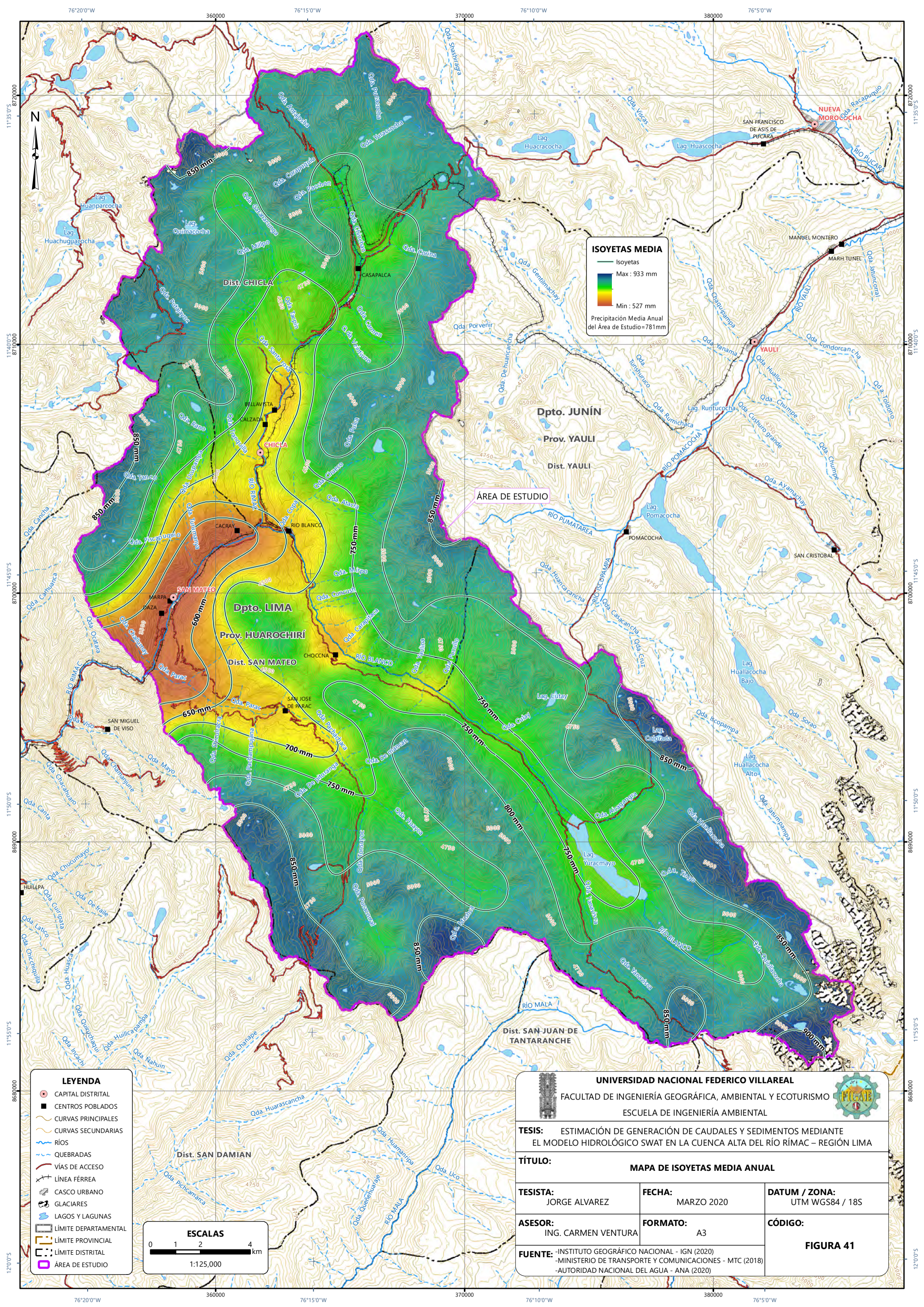
Temperatura Mínima Media Anual del Área de Estudio = 1.2 °C

ÁREA DE ESTUDIO

- LEYENDA**
- CAPITAL DISTRITAL
 - CENTROS POBLADOS
 - CURVAS PRINCIPALES
 - CURVAS SECUNDARIAS
 - RÍOS
 - QUEBRADAS
 - VÍAS DE ACCESO
 - LÍNEA FÉRREA
 - CASCO URBANO
 - GLACIARES
 - LAGOS Y LAGUNAS
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



<p>UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO</p> <p>ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL</p>		
<p>TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA</p>		
<p>TÍTULO: MAPA 16 – MAPA DE ISOTERMAS MÍNIMAS MEDIO ANUAL</p>		
<p>TESISTA: JORGE ALVAREZ</p>	<p>FECHA: MARZO 2020</p>	<p>DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S</p>
<p>ASESOR: ING. CARMEN VENTURA</p>	<p>FORMATO: A3</p>	<p>CÓDIGO:</p>
<p>FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020) -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018) -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)</p>		
<p>FIGURA 40</p>		



ISOYETAS MEDIA

— Isoyetas

Max : 933 mm

Min : 527 mm

Precipitación Media Anual del Área de Estudio = 781mm

ÁREA DE ESTUDIO

LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CENTROS POBLADOS
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO

ESCALAS

0 1 2 4 km

1:125,000

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

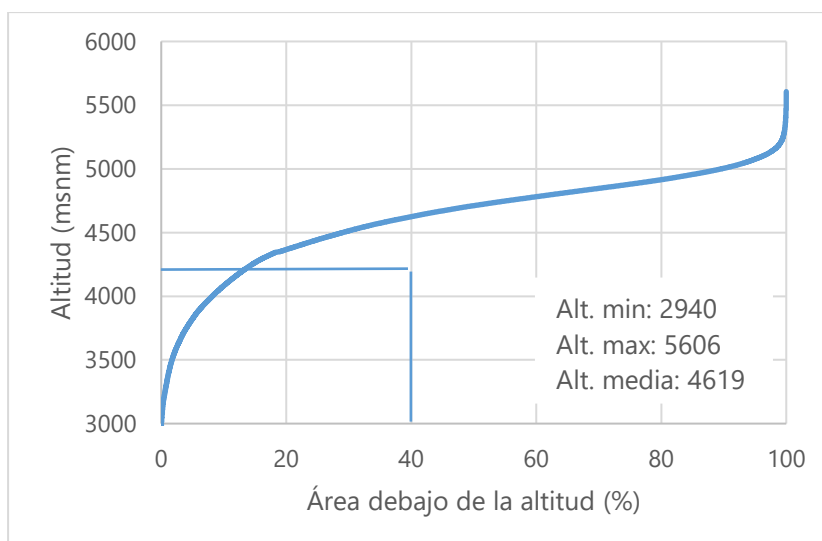
TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE ISOYETAS MEDIA ANUAL

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO:
FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020) -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018) -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)		

FIGURA 41

Figura 42.
Curva hipsométrica de la cuenca alta del río Rímac



El área de estudio se subdividió en 31 subcuencas. La clasificación en subcuencas es un requisito del modelo SWAT y es realizado automáticamente por ArcSWAT en las primeras etapas de la configuración del modelo.

El desarrollo detallado de las subcuencas está en la sección 4.3.1 “Subcuencas y URH resultantes”

Figura 43.
Red hídrica y subcuencas del área de estudio

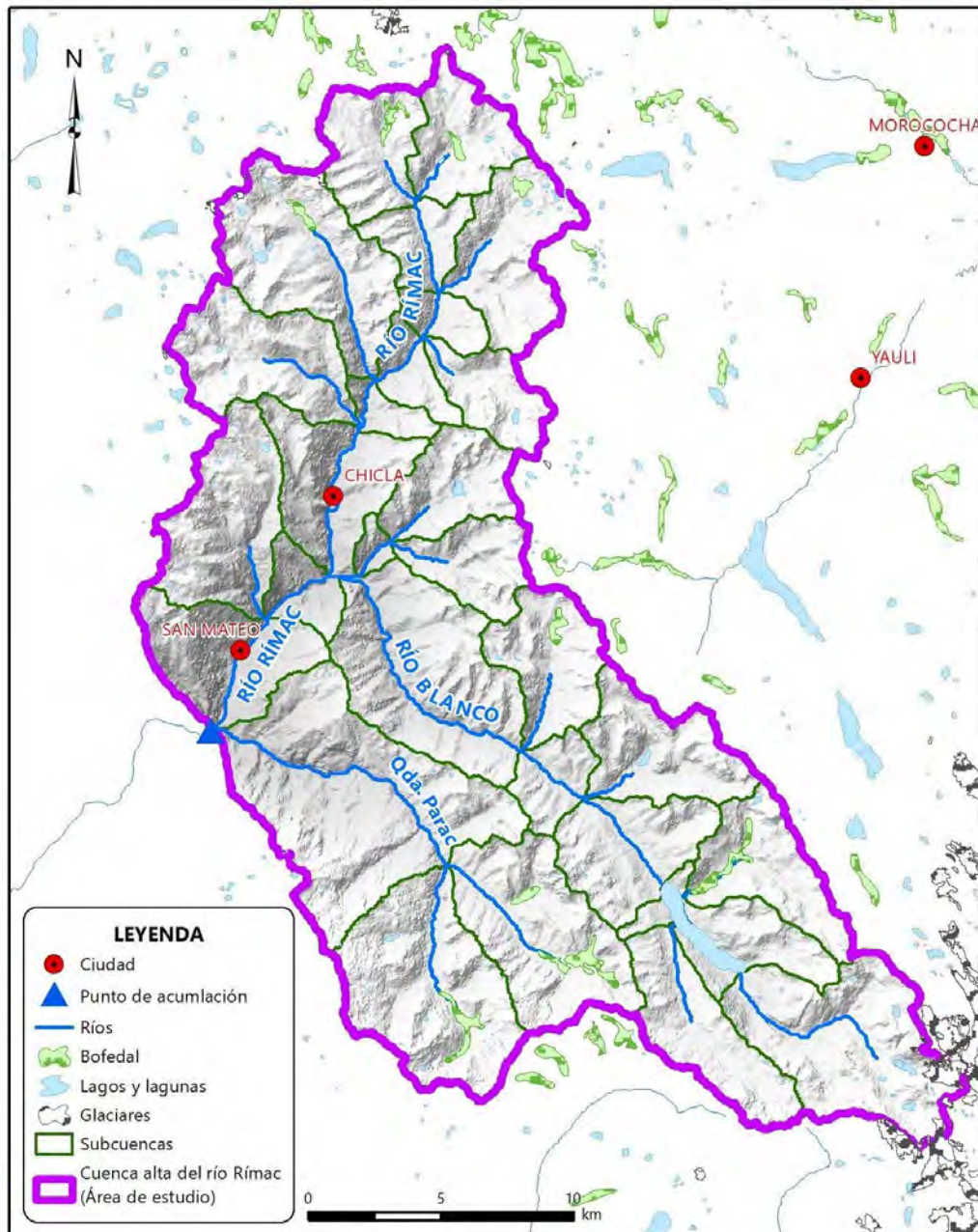
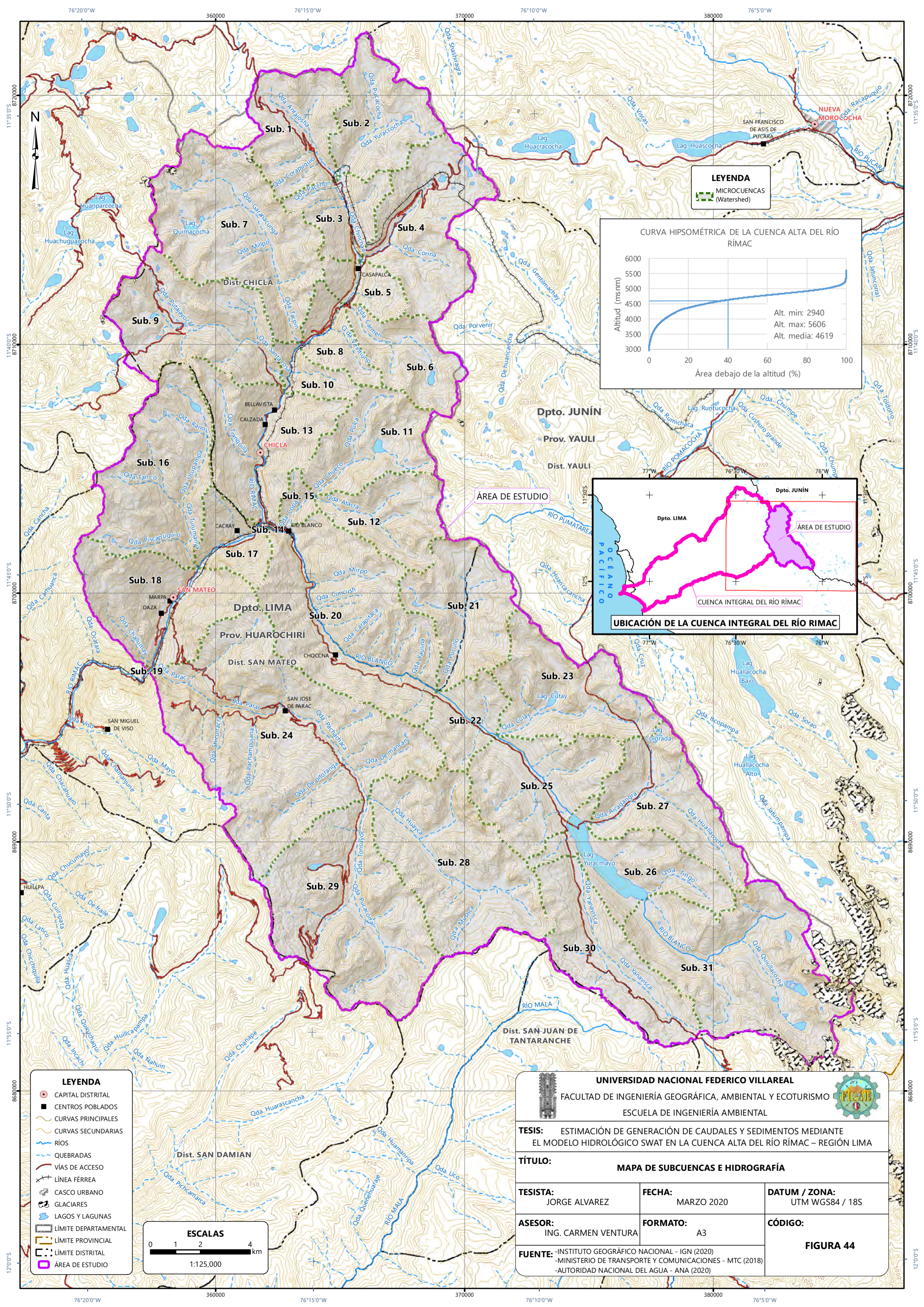


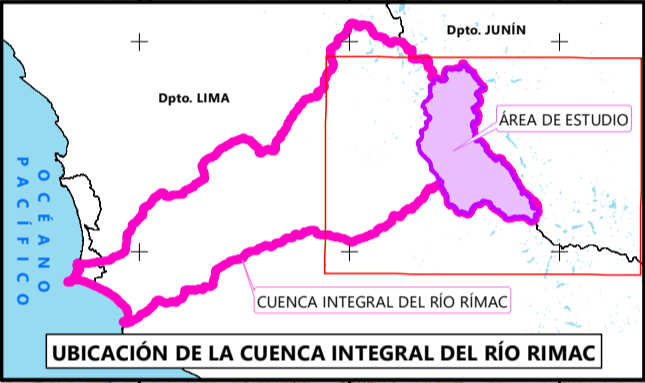
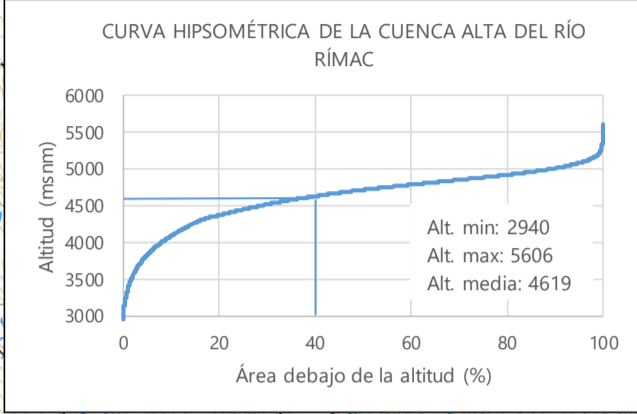
Figura 44.

Figura de Mapa de subcuencas e hidrografía que muestra la división de subcuencas y red hidrográfica del área de estudio.

(siguiente página)

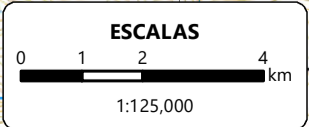


LEYENDA
 MICROCUENCAS (Watershed)



LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CENTROS POBLADOS
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE SUBCUENCAS E HIDROGRAFÍA

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 44

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)

3.9.3 Diagnóstico biológico

3.9.3.1 Zonas de vida.

Se ubican las siguientes zonas de vida en el área de estudio: estepa Montano Tropical, estepa espinosa Montano Bajo Tropical, Nival Tropical, paramo húmedo Subalpino Tropical, paramo muy húmedo Subalpino Tropical, tundra pluvial Alpino Tropical.

Figura 45.

Figura de Mapa de zonas de vida que muestra la distribución de zonas de vida en el área de estudio.

(siguiente página)

3.9.3.2 Ecorregiones.

Según la clasificación de Antonio Brack Egg se ubican dos ecorregiones en el área de estudio: Puna y serranía esteparia.

Figura 46.

Figura de Mapa de ecorregiones que muestra las categorías de ecorregiones en el área de estudio.

(siguiente página)

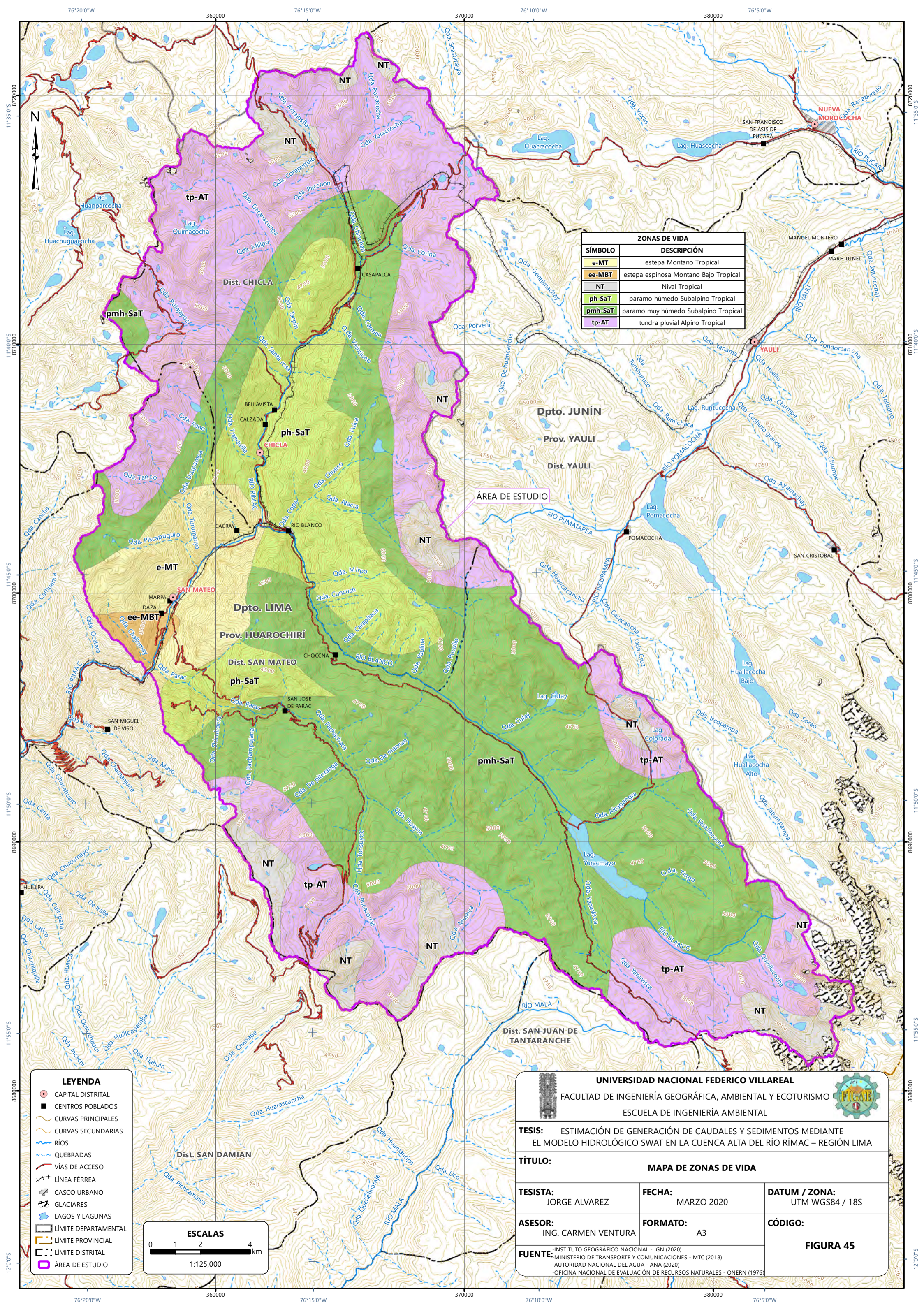
3.9.3.3 Cobertura vegetal.

La cobertura vegetal del área de estudio fue realizada a partir de imágenes satelitales Sentinel 2B esto por ser la metodología más precisa y actualizada para obtenerlos, también fueron compatibilizadas con las categorías que acepta el modelo SWAT. En definitiva, se encuentran las siguientes coberturas vegetales.

Tabla 28.

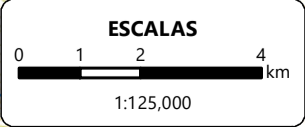
Cobertura vegetal

SÍMBOLO SWAT	DESCRIPCIÓN	%
WATR	Agua, nieve y hielo	9.2
SWRN	Escasa/estérilvegetación	43.9

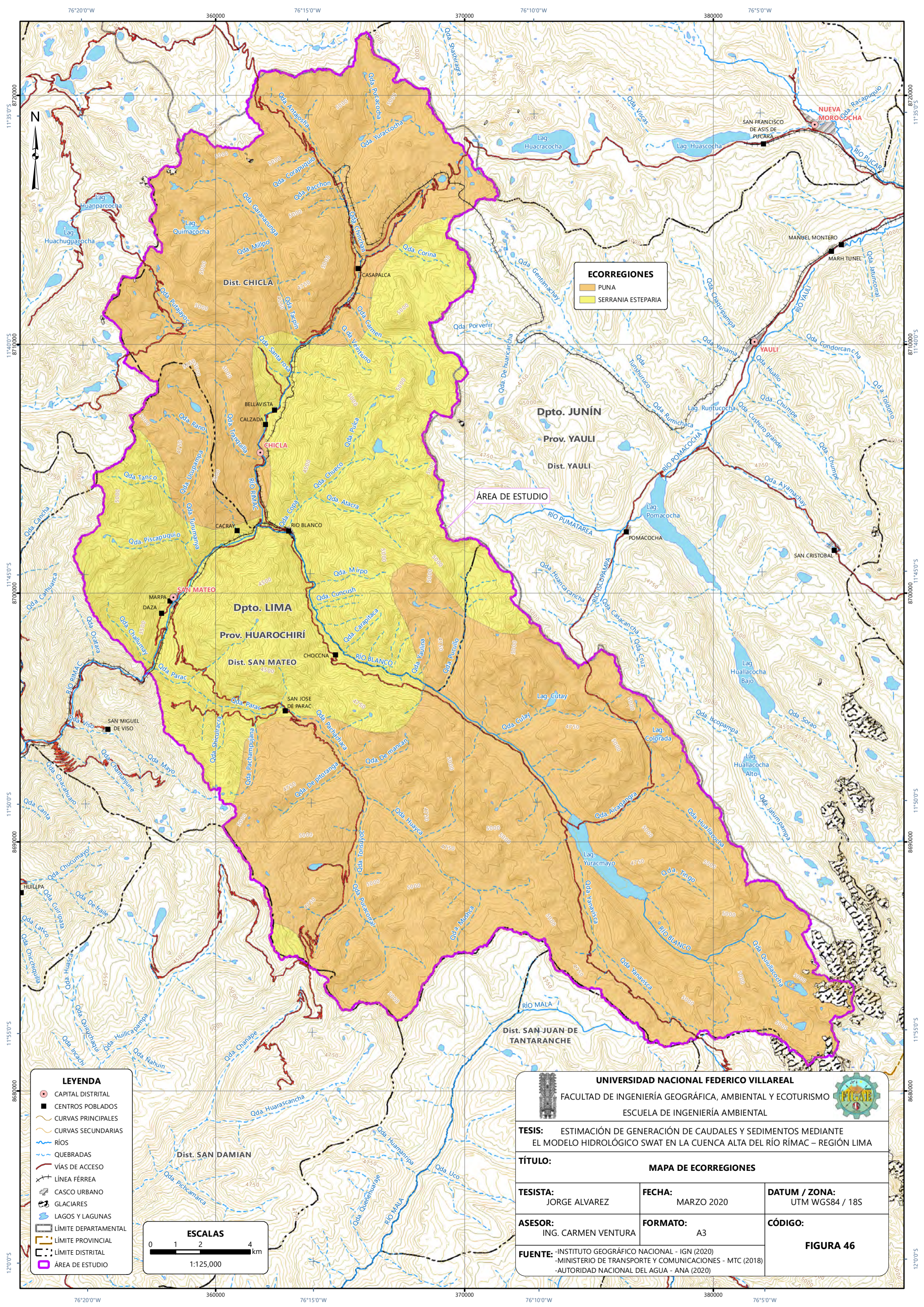


ZONAS DE VIDA	
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
e-MT	estepa Montano Tropical
ee-MBT	estepa espinosa Montano Bajo Tropical
NT	Nival Tropical
ph-SaT	paramo húmedo Subalpino Tropical
pmh-SaT	paramo muy húmedo Subalpino Tropical
tp-AT	tundra pluvial Alpino Tropical

LEYENDA	
	CAPITAL DISTRITAL
	CENTROS POBLADOS
	CURVAS PRINCIPALES
	CURVAS SECUNDARIAS
	RÍOS
	QUEBRADAS
	VÍAS DE ACCESO
	LÍNEA FÉRREA
	CASCO URBANO
	GLACIARES
	LAGOS Y LAGUNAS
	LÍMITE DEPARTAMENTAL
	LÍMITE PROVINCIAL
	LÍMITE DISTRITAL
	ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL		
TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA		
TÍTULO: MAPA DE ZONAS DE VIDA		
TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: <div style="text-align: right;">FIGURA 45</div>
FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020) -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018) -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020) -OFICINA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE RECURSOS NATURALES - ONERN (1976)		



ECORREGIONES

- PUNA
- SERRANIA ESTEPARIA

ÁREA DE ESTUDIO

LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CENTROS POBLADOS
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO

ESCALAS

0 1 2 4 km

1:125,000

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE ECORREGIONES

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO:

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
-MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
-AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)

FIGURA 46

RNGB	Arbusto/matorral	36.4
PAST	Césped/Pasto	7.5
FRST	Bosque mixto	1.3
WETL	Humedal	0.7
AGRL	Tierra agrícola general/cereales	1.0

Figura 47.

Figura de Mapa de cobertura vegetal que muestra las categorías de cobertura vegetal en el área de estudio.

(siguiente página)

3.9.3.4 Ecosistemas y ecosistemas frágiles.

En la siguiente tabla se describe los ecosistemas y ecosistemas frágiles ubicados en el área de estudio.

Tabla 29.

Ecosistemas y ecosistemas frágiles

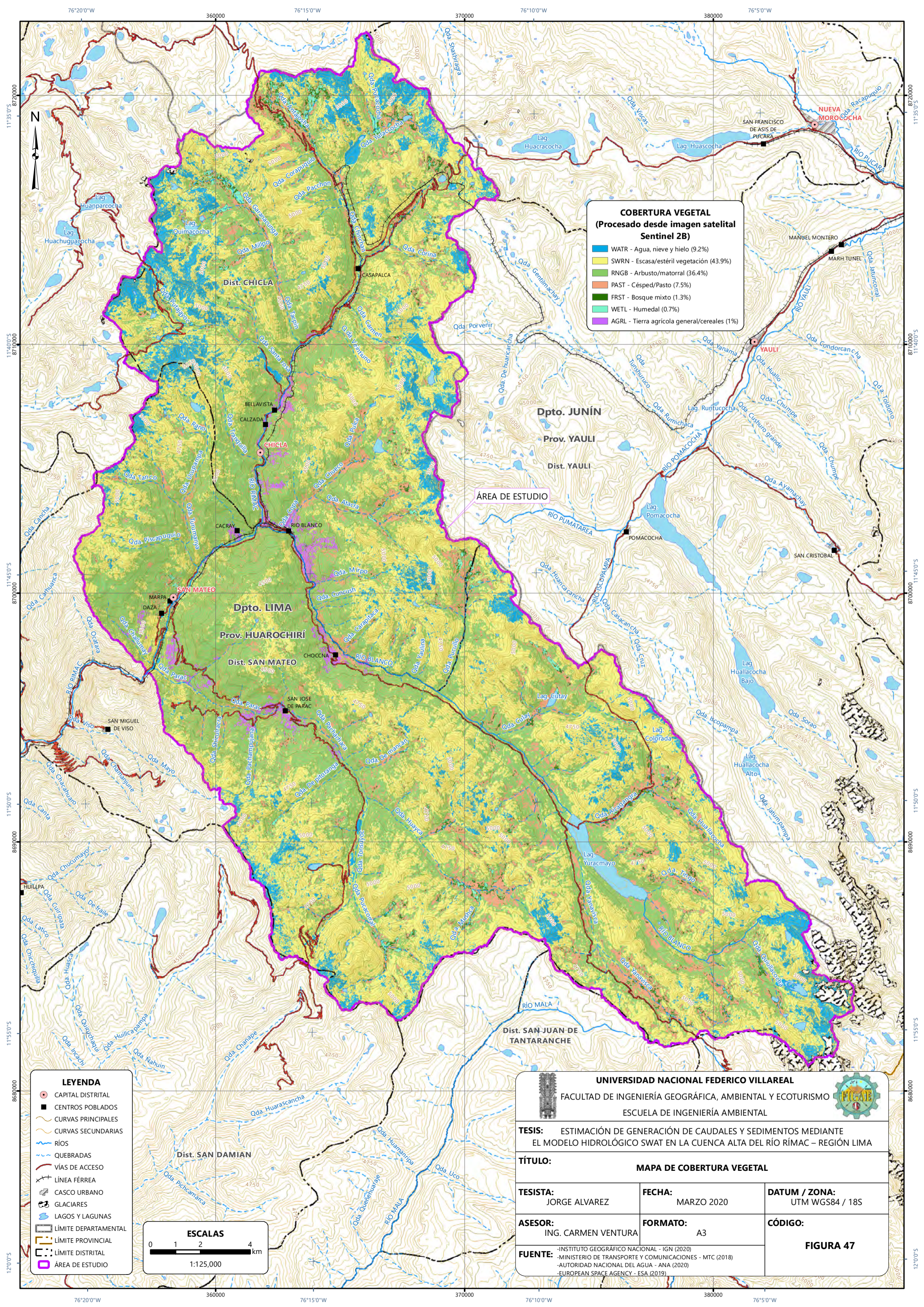
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
Otras áreas	
Agri	Zona agrícola
Min	Zona minera
Ecosistemas	
Ma	Matorral andino
Pjph	Pajonal de puna húmeda
Zp	Zona periglaciár
Ecosistemas frágiles	
Bo	Bofedal
L	Lago y laguna
Zgla	Zona glaciár

Nota. Adaptado de MINAM, 2018.

Figura 48.

Figura de Mapa de ecosistemas y ecosistemas frágiles que muestra las categorías de ecosistemas y ecosistemas frágiles en el área de estudio.

(siguiente página)



COBERTURA VEGETAL
(Procesado desde imagen satelital Sentinel 2B)

- WATR - Agua, nieve y hielo (9.2%)
- SWRN - Escasa/estéril vegetación (43.9%)
- RNGB - Arbusto/matorral (36.4%)
- PAST - Césped/Pasto (7.5%)
- FRST - Bosque mixto (1.3%)
- WETL - Humedal (0.7%)
- AGR - Tierra agrícola general/cereales (1%)

LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CENTROS POBLADOS
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO

ESCALAS

0 1 2 4 km

1:125,000

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

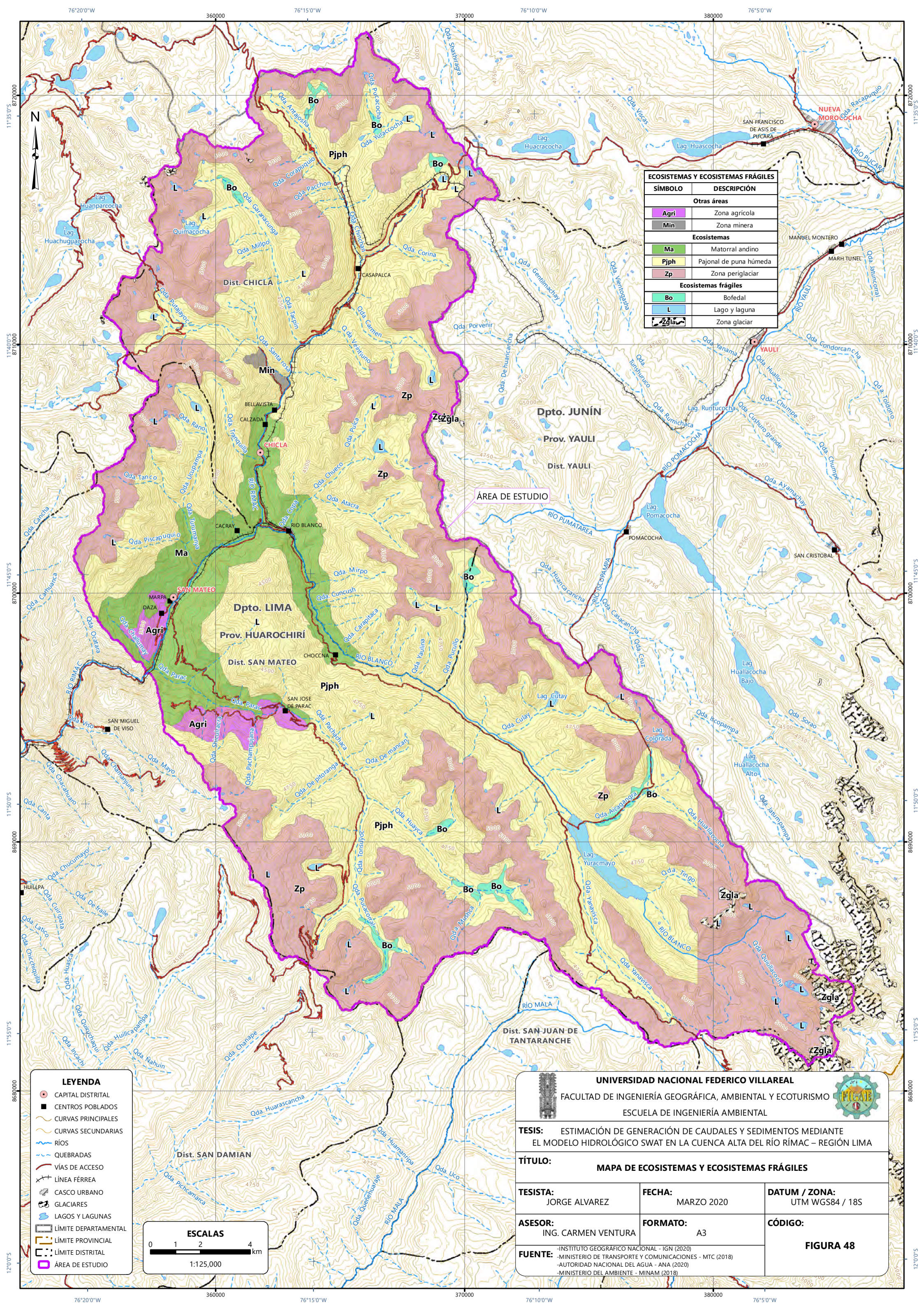
TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE COBERTURA VEGETAL

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO:

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
 -EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA (2019)

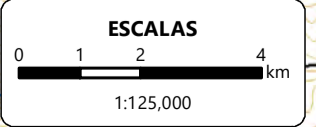
FIGURA 47



ECOSISTEMAS Y ECOSISTEMAS FRÁGILES	
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
Otras áreas	
Agri	Zona agrícola
Min	Zona minera
Ecosistemas	
Ma	Matorral andino
Pjph	Pajonal de puna húmeda
Zp	Zona periglacial
Ecosistemas frágiles	
Bo	Bofedal
L	Lago y laguna
Zgla	Zona glaciar

ÁREA DE ESTUDIO

LEYENDA	
	CAPITAL DISTRITAL
	CENTROS POBLADOS
	CURVAS PRINCIPALES
	CURVAS SECUNDARIAS
	RÍOS
	QUEBRADAS
	VÍAS DE ACCESO
	LÍNEA FÉRREA
	CASCO URBANO
	GLACIARES
	LAGOS Y LAGUNAS
	LÍMITE DEPARTAMENTAL
	LÍMITE PROVINCIAL
	LÍMITE DISTRITAL
	ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE ECOSISTEMAS Y ECOSISTEMAS FRÁGILES

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO:

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
 -MINISTERIO DEL AMBIENTE - MINAM (2018)

FIGURA 48

3.9.3.5 Área natural protegida.

No se ubican ninguna Área Natural Protegida dentro del área de estudio, los más cercanos son “Reserva paisajística Nor Yauyos-Cochas” a 0 km (contiguo) y “Zona reservada bosques de Zárate” a 22.7 km.

Figura 49.

Figura de Mapa de áreas naturales protegidas que muestra la ubicación y distancias de las Áreas Naturales Protegidas más cercanas al área de estudio.

(siguiente página)

3.9.4 Diagnóstico Socioeconómico

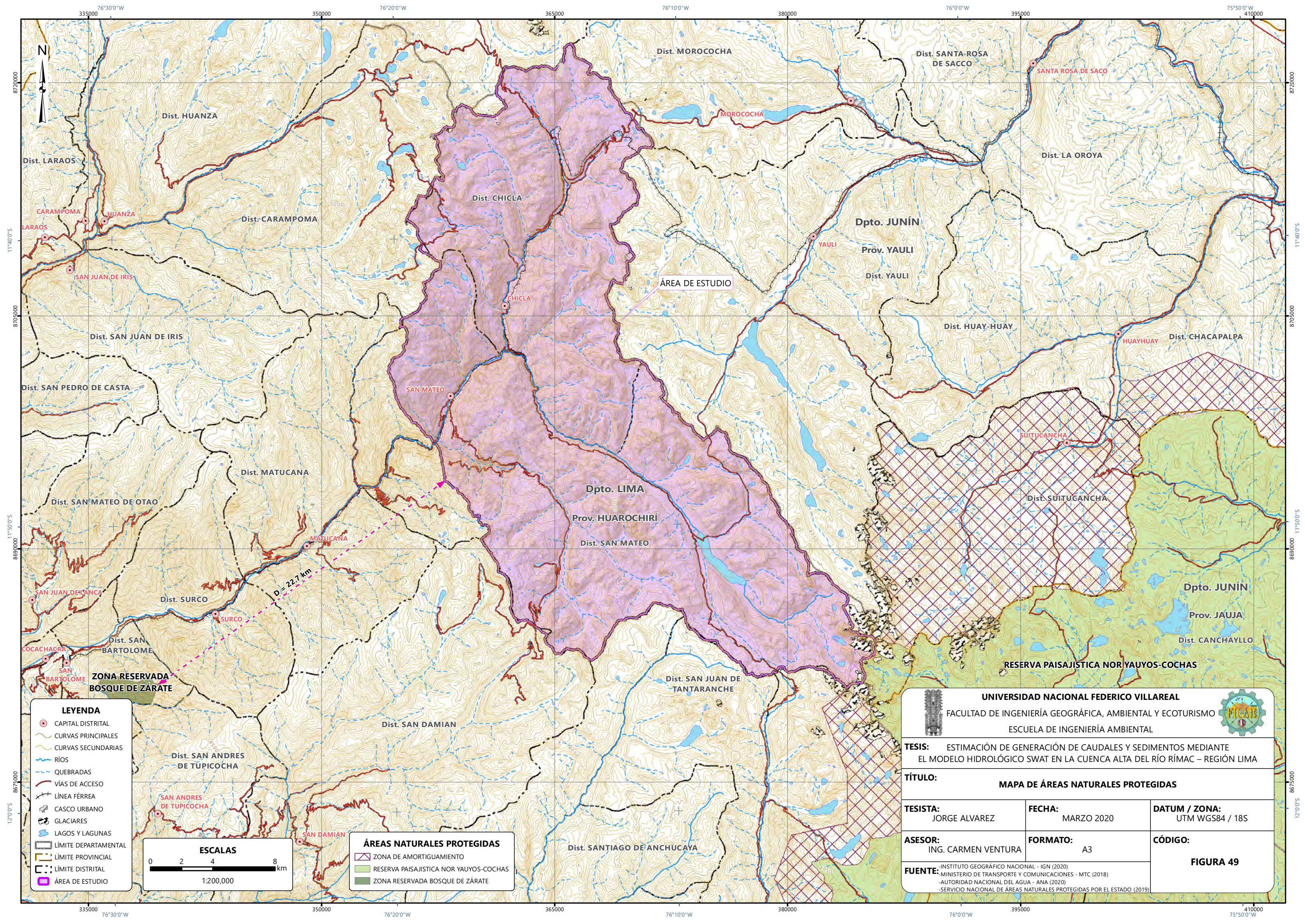
3.9.4.1 Población.

La cuenca media y alta del río Rímac presenta poblaciones por debajo de los 7,000 hab. en los distritos del río Rímac más importantes son Chicla, Matucana, San Mateo, Ricardo Palma, Santa Cruz de Cocachacra, Surco y San Bartolomé. Estos distritos varían en porcentaje de población urbana y rural, correspondiendo a Ricardo Palma el 85.29% y a Cocachacra, menos del 24.41%. En los distritos del río Santa Eulalia, el distrito más poblado es Santa Eulalia, San Pedro de Casta y Callahuanca.

3.9.4.2 Actividades económicas y uso del territorio

A. Uso de tierra. La mayoría de la provincia de Huarorichí es agrícola y se encuentra bajo riego.

En los distritos de la provincia de Huarochirí, se aprovecha peor la tierra, ya que sólo un 33.65% de la superficie está destinada a los cultivos transitorios. Las tierras sin trabajar son



LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO

ESCALAS

0 2 4 8 km

1:200,000

ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS

- ▨ ZONA DE AMORTIGUAMIENTO
- ▨ RESERVA PAISAJÍSTICA NOR YAUYOS-COCHAS
- ▨ ZONA RESERVADA BOSQUE DE ZÁRATE

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 49

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
 -SERVICIO NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS POR EL ESTADO (2019)

el 26.07% de las tierras de labranza, las tierras en descanso el 25.88% y las tierras en barbecho el 14.39%.

La superficie agrícola y no agrícola de la provincia de Huarochirí se descompone en: pastos naturales con el 68.46%, montes y bosques con el 1.39% y toda otra clase de tierras, con el 30.15%.

B. Minería. Chicla, es el distrito minero con 51.12% de PEA dedicada a ello. Siendo Casapalca-Yauliyacu el consorcio minero más importante. Esta zona presenta una gran cantidad de relaves, que se han ido acumulado por décadas, por la explotación de productos metálicos como Cobre, Plomo, Zinc y Plata.

En el distrito de San Mateo, la minería es la segunda actividad por participación por PEA después de la agricultura; con un 13.69%.

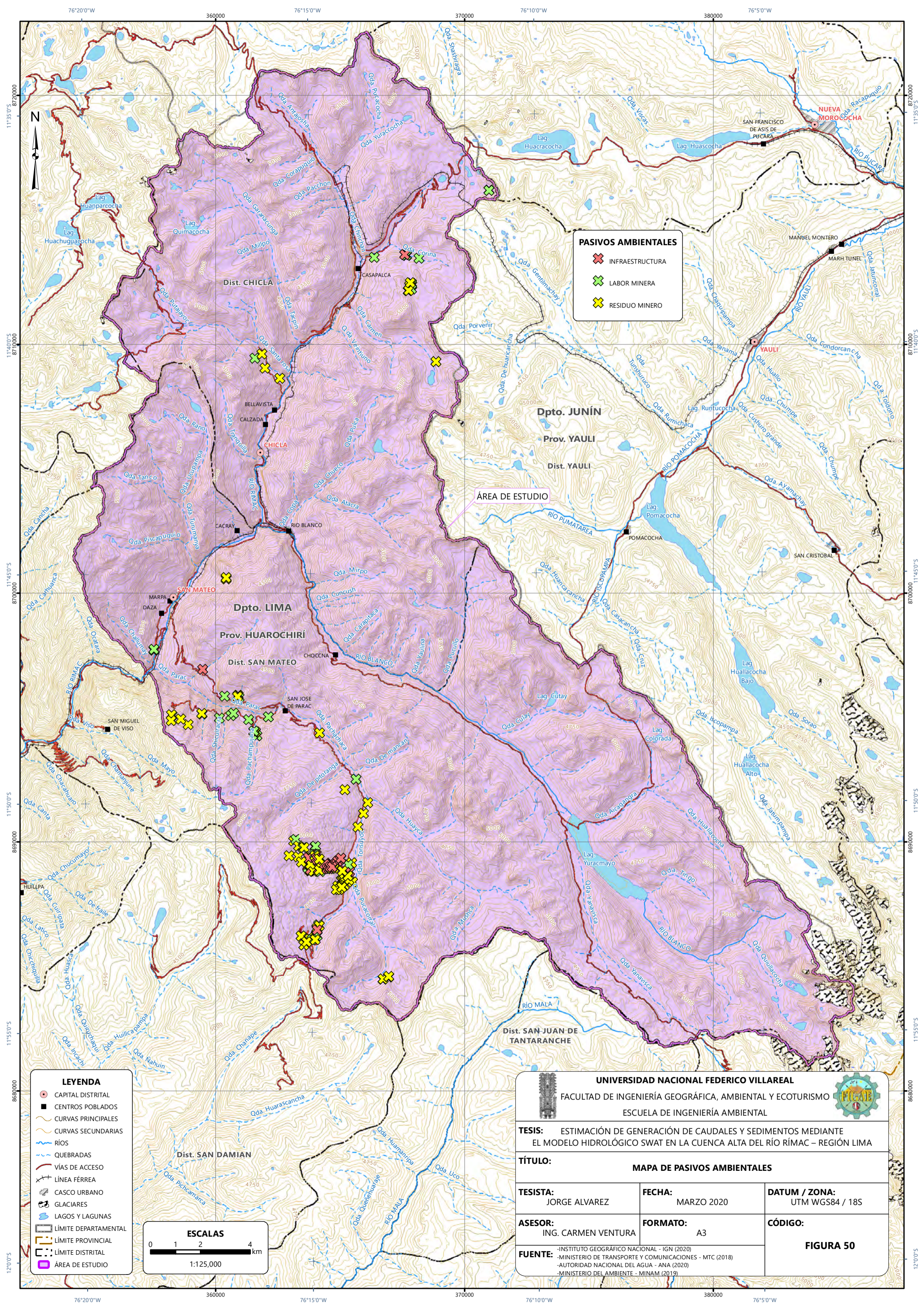
3.9.4.3 Pasivos ambientales.

En el área de estudio se identifican 168 pasivos ambientales por el MINAM (2019) clasificados en infraestructura, labor y residuo mineros.

Figura 50.

Figura de Mapa de pasivos ambientales que muestra la ubicación de los pasivos ambientales presentes en el área de estudio.

(siguiente página)



PASIVOS AMBIENTALES

- ✕ INFRAESTRUCTURA
- ✕ LABOR MINERA
- ✕ RESIDUO MINERO

ÁREA DE ESTUDIO

LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CENTROS POBLADOS
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO

ESCALAS

0 1 2 4 km

1:125,000

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE PASIVOS AMBIENTALES

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO:

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
-MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
-AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)
-MINISTERIO DEL AMBIENTE - MINAM (2019)

FIGURA 50

IV: RESULTADOS

4.1 Validación de la aplicación del modelo hidrológico SWAT

4.1.1 Configuración del modelo SWAT

En esta sección se detallan los procedimientos específicos que seguirá la investigación para la correcta configuración inicial y ejecución del modelo en la cuenca alta del río Rímac (sin calibración aún), se detallará paso a paso la puesta en marcha del modelo hidrológico (computarizado) SWAT e identificará las zonas de mayor generación de caudales y sedimentos en la subcuenca.

En la siguiente sección 4.1.2 se ajustará aún más los parámetros del modelo, calibrándolo con ayuda de la información hidrométrica real de campo, se “jugará” con los parámetros con ensayo y error con ayuda del software SWAT-CUP hasta obtener valores cercanos a la realidad.

A continuación, se detallan los valores y parámetros elegidos para la primera ejecución del modelo SWAT.

- Delimitación de subcuencas: 1 000 ha de destino
- Elevation Bands: 500 m y 3 bandas
- Curva número (CN2): 60 en las subcuencas 15, 17, 18, 20 y 24; 78 en las demás
- Ajustes menores en la tabla de lagos y lagunas (Pond)
- Inicio y fin de simulación: Desde 1/1/1981 hasta 31/12/2016 (13 148 días, 36 años)
- Distribución de precipitación: Distribución normal asimétrica (Skewed normal)
- Versión de SWAT.exe: Lanzamiento de 64-bit
- Años de omisión (para la recarga del acuífero): 3 años
- Datos del embalse (reservoir): Ajustes menores

4.1.2 Calibración y validación al modelo SWAT

En esta sección se detallan los procedimientos específicos que seguirá la investigación para la correcta calibración y validación del modelo hidrológico SWAT, se detallarán las diferencias del modelo antes y después de la calibración.

En la sección anterior se configuró y ejecutó el modelo teniendo resultados cercanos a la realidad, pero aún falta ajustar algunos parámetros para obtener los resultados simulados y observados los más parecidos posibles. Dichos parámetros son locales, se obtienen a ensayo y error y pueden ser utilizados en otras investigaciones de cuencas cercanas.

4.1.2.1 Subcuencas y URH resultantes.

La ejecución del modelo SWAT clasificó al área de estudio en 31 subcuencas (intercuenca y subcuenca propiamente dicha) los cuales se detallan a continuación

Tabla 30.
Subcuencas clasificadas por SWAT

SUB-CUENC A	ÁREA (km ²)	PENDIENTE (%)	LONGITUD DEL RÍO PRINCIPAL (km)	PENDIENTE DEL RÍO (%)	ANCHO DEL RÍO (m)	PROF. DEL RÍO (m)	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD MEDIA (msnm)	ALTITUD MIN. (msnm)	ALTITUD MAX. (msnm)	PERÍ- METRO (km)
1	15.56	43.76	6.36	10.47	6.69	0.39	-11.587998	-76.254447	4844	4392	5247	23.65
2	15.40	41.91	7.62	10.10	6.65	0.39	-11.584421	-76.223646	4842	4393	5191	26.38
3	9.28	49.55	6.18	14.49	4.91	0.32	-11.61885	-76.237414	4682	4250	5148	19.48
4	22.36	40.65	9.38	9.25	8.32	0.45	-11.624008	-76.205893	4793	4250	5252	32.33
5	5.63	52.70	3.54	25.13	3.64	0.26	-11.646311	-76.229135	4614	4172	5225	12.95
6	11.61	51.61	8.07	14.13	5.62	0.35	-11.672052	-76.213277	4820	4177	5349	21.58
7	33.22	51.97	12.00	11.01	10.55	0.53	-11.625531	-76.276399	4797	4012	5337	37.03
8	6.79	57.46	5.04	20.79	4.07	0.28	-11.665059	-76.240441	4517	4012	5060	16.18
9	24.06	51.35	10.29	13.68	8.70	0.46	-11.659158	-76.292701	4785	3882	5331	31.95
10	4.54	60.38	4.33	25.95	3.20	0.24	-11.677969	-76.249128	4417	3884	5041	13.35
11	15.15	54.88	6.98	19.32	6.59	0.39	-11.702946	-76.227421	4704	3885	5301	23.35
12	12.74	58.52	7.01	20.51	5.94	0.36	-11.729342	-76.219441	4708	3885	5331	22.25
13	22.07	61.36	9.78	15.59	8.26	0.45	-11.701089	-76.267987	4261	3451	5298	30.30
14	0.02	105.40	1.10	8.45	0.11	0.03	-11.733576	-76.265549	3540	3470	3686	2.58
15	2.28	65.01	3.74	26.47	2.12	0.18	-11.724053	-76.254756	3980	3486	4516	10.03
16	26.15	58.17	10.42	18.95	9.14	0.48	-11.714075	-76.304886	4589	3240	5297	32.93
17	7.45	75.41	4.84	22.62	4.30	0.29	-11.738215	-76.278683	3873	3240	4737	15.88
18	22.49	64.12	7.67	23.62	8.35	0.45	-11.760178	-76.305897	3873	2940	5027	28.85
19	0.09	77.83	0.70	59.02	0.31	0.05	-11.78576	-76.309836	3082	2941	3362	2.73
20	39.86	59.27	13.95	9.50	11.77	0.57	-11.766756	-76.235615	4337	3480	5135	36.05
21	18.03	51.17	8.16	12.04	7.31	0.41	-11.762808	-76.193519	4748	4130	5275	27.18

22	8.47	51.08	5.11	18.60	4.65	0.31	-11.80313	-76.192617	4564	4129	5186	16.50
23	20.48	54.50	8.67	10.48	7.90	0.43	-11.793647	-76.155897	4765	4265	5275	31.95
24	59.11	54.36	17.47	12.89	14.91	0.66	-11.809704	-76.261347	4366	2945	5297	52.08
25	20.27	42.43	8.12	9.49	7.85	0.43	-11.827067	-76.166057	4654	4264	5263	26.28
26	17.00	39.80	9.25	8.30	7.06	0.40	-11.857127	-76.130416	4661	4343	5175	34.65
27	19.08	48.07	9.77	9.59	7.57	0.42	-11.834511	-76.118742	4801	4347	5291	30.25
28	32.60	46.25	10.75	8.27	10.44	0.52	-11.855105	-76.197119	4742	4227	5264	35.98
29	38.38	50.66	11.70	9.07	11.51	0.56	-11.873924	-76.235722	4804	4226	5294	37.15
30	21.05	35.88	10.58	6.22	8.03	0.44	-11.889608	-76.140492	4783	4350	5134	32.08
31	38.39	48.43	13.07	8.16	11.51	0.56	-11.893552	-76.09079	4879	4345	5606	41.68

Tabla 31.*Parámetros de la cuenca integral del modelo (área de estudio)*

CUENCA	ÁREA (km ²)	PENDIENTE (%)	LONGITUD DEL RÍO PRINCIPAL (km)	PENDIENTE DEL RÍO PRINCIPAL (%)	LATITUD	LONGITUD	ELEV. MEDIA (msnm)	ELEV. MIN. (msnm)	ELEV. MAX. (msnm)	PERÍMETRO (km)
Cuenca alta del río Rímac	589.60	54.97	41.37	4.33	-11.76135	-76.219759	4618.89	2940	5606	204.83

En el “Mapa 18. Mapa de subcuencas e hidrografía” (figura 44) se muestra las 31 subcuencas del área de estudio.

Con la configuración detallada en la sección anterior (4.2 Variables de entrada y configuración del modelo SWAT) se obtuvieron 1283 URH (también conocido como *HRU*). Estas zonas compartirán el mismo suelo, cobertura vegetal y rango de pendiente (Hernández, 2015). Por lo tanto, su comportamiento hidrológico (percolación, evapotranspiración, escurrimiento, entre otros) en estas zonas serán similares ya que comparten las mismas características.

4.1.2.2 Configuración de la calibración y validación.

Con el proceso de calibración se identifican los valores de los parámetros del modelo; la serie de datos simulados se ajustará de manera óptima con la serie de datos observados.

Entonces, con el propósito de mejorar la calidad del modelo a niveles aceptables se hace unos ajustes a los parámetros del modelo, dichos parámetros están inicialmente establecidos con valores medios universales, y es justamente en esta etapa de calibración en donde se encontrarán los valores específicos locales para nuestra área de estudio (y alrededores). Al no poseer información de larga trayectoria temporal de sedimentos, se opta por una calibración versus caudales diarios el cual se tiene de un buen registro histórico, se calibrará específicamente con la Estación Río Blanco, usando los registros disponibles de las Estaciones San Mateo y Tamboraque como comprobación.

Las calibraciones de los modelos SWAT son usualmente llevadas en programas informáticos, aunque también podrían ser llevados manualmente, el más usado en el medio es

“SWAT-CUP” desarrollado por el instituto independiente suizo 2w2e. SWAT-Cup cuenta con los siguientes algoritmos: SUFI2, GLUE, ParaSol y MCMC. La presente investigación utiliza el algoritmo SUFI2 por presentar los mejores resultados en varias investigaciones publicadas.

En el “Mapa 14. Mapa de estaciones meteorológicas e hidrométricas” (figura 38) se muestra las tres estaciones hidrométricas utilizadas en la calibración del modelo.

Datos de la calibración del modelo:

- Versión de SWAT: 2012
- Arquitectura del procesador: 64-bit
- Tipo de proyecto: Sufi2
- Número de simulaciones: 500
- Parámetros utilizados: 51 parámetros (ALPHA_BF.gw, GW_DELAY.gw, GW_REVAP.gw, GWQMN.gw, REVAPMN.gw, ESCO.hru, EPCO.hru, CANMX.hru, TIMP.bsn, SMFMX.bsn, SMFMN.bsn, SFTMP.bsn, SMTMP.bsn, SURLAG.bsn, CH_K2.rte, CH_N2.rte, CN2.mgt, TLAPS.sub, SHALLST.gw, DEEPST.gw, RCHRG_DP.gw, GWHT.gw, GW_SPYLD.gw, BIOMIX.mgt, IPND1.pnd, IPND2.pnd, IFLOD1.pnd, IFLOD2.pnd, PND_PSA.pnd, PND_PVOL.pnd, PND_ESA.pnd, PND_EVOL.pnd, PND_VOL.pnd, WET_NSA.pnd, WET_NVOL.pnd, WET_MXSA.pnd, WET_MXVOL.pnd, WET_VOL.pnd, RES_ESA.res, RES_EVOL.res, RES_PSA.res, RES_PVOL.res, RES_VOL.res, EVRSV.res, RES_RR.res, IFLOD1R.res, IFLOD2R.res, NDTARGR.res, WURTNF.res, OFLOWMN_FPS.res, STARG_FPS.res)

- Tipo de ajuste: r^2
- Fecha de calibración: 1ro de enero de 1984 al 31 de diciembre del 1992*
- Fecha de validación: 1ro de enero de 1993 al 31 de diciembre del 2001
- Paso del tiempo: Diario

*El modelo integral inicia desde 1981, pero se configuró tres años de omisión de resultados para esperar la recarga de los acuíferos. Entonces recién hay datos simulados para calibrar desde 1984.

Tabla 32.
Parámetros de calibración

SENSIBILIDAD	PARÁMETRO	RANGO	VALOR ORIGINAL	VALOR CALIBRADO	MÉTODO DE REEMPLAZO	DESCRIPCIÓN	t-stat	P-Value
1	ALPHA_BF.gw	0 - 1	0.048	0.4505	Reemplazo	Factor alfa del flujo base (días)	2.227	0.031
49	BIOMIX.mgt	0 - 1	0.2	0.3911	Reemplazo	Eficiencia de mezcla biológica	-0.014	0.989
2	CANMX.hru	0 - 100	0	6.5093	Reemplazo	Almacenamiento máximo de dosel	1.811	0.076
6	CH_K2.rte	0 - 250	0	221.2512	Reemplazo	Conductividad hidráulica efectiva en el aluvión del canal principal	1.432	0.159
22	CH_N2.rte	-0.01 - 0.3	0.014	0.0659	Reemplazo	Valor "n" de la ecuación de Manning para el canal principal	-0.697	0.489
45	CN2.mgt	-0.3 - 0.3	(60/78)	0.261	Relativo	Valor inicial de Número de curva	-0.105	0.917
8	DEEPST.gw	0 - 5000	2000	4425.0015	Reemplazo	Profundidad inicial del agua en el acuífero profundo (mm)	1.370	0.177
27	EPCO.hru	0 - 1	1	0.1139	Reemplazo	Factor de compensación de la absorción de plantas (adimensional)	-0.530	0.598
19	ESCO.hru	0 - 1	0.95	0.3219	Reemplazo	Factor de compensación de evaporación del suelo (adimensional)	0.949	0.347
32	EVRSV.res	0.1 - 0.9	0.6	0.328	Reemplazo	Coefficiente de evaporación del lago	0.402	0.689
25	GW_DELAY.gw	0 - 500	31	252.5049	Reemplazo	Tiempo de retardo en aguas subterráneas (días)	0.621	0.537
36	GW_REVAP.gw	0.02 - 0.2	0.02	0.1109	Reemplazo	Coefficiente "revap" de aguas subterráneas (adimensional)	-0.196	0.845
50	GW_SPYLD.gw	0 - 0.4	0.003	0.0432	Reemplazo	Rendimiento específico del acuífero poco profundo (m3/m3)	-0.009	0.993
37	GWHT.gw	0 - 25	1	8.3816	Reemplazo	Altura inicial de las aguas subterráneas (m)	-0.190	0.850
28	GWQMN.gw	0 - 5000	1000	575.0089	Reemplazo	Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial requerido para que el 'flujo de retorno' ocurra (mm)	0.530	0.598
15	IFLOD1.pnd	4 - 7	0	7	Reemplazo	Mes de inicio de temporada de estiaje (1 = enero, 12 = diciembre)	-1.074	0.288

44	IFL0D1R.res	4 - 7	6	4	Reemplazo	Mes de inicio de temporada de estiaje. Necesario si "Opción de simulación de salida" = "Simulado - Liberación objetivo" (1 = enero, 12 = diciembre)	0.106	0.916
24	IFL0D2.pnd	8 - 11	0	10	Reemplazo	Mes de fin de temporada de estiaje (1 = enero, 12 = diciembre)	0.623	0.536
35	IFL0D2R.res	8 - 11	9	11	Reemplazo	Mes de fin de temporada de estiaje. Necesario si "Opción de simulación de salida" = "Simulado - Liberación objetivo" (1 = enero, 12 = diciembre)	-0.274	0.785
26	IPND1.pnd	4 - 7	1	5	Reemplazo	Mes de inicio de la "temporada" de asentamiento de nutrientes de mitad de año (1 = enero, 12 = diciembre)	0.570	0.571
12	IPND2.pnd	8 - 11	1	9	Reemplazo	Mes de fin de la "temporada" de asentamiento de nutrientes de mitad de año (1 = enero, 12 = diciembre)	1.158	0.253
48	NDTARGR.res	1 - 200	1	189.055	Reemplazo	Número de días para llegar a la capacidad objetivo desde la capacidad actual del embalse. Necesario si "Opción de simulación de flujo de salida" = "Simulado - Liberación objetivo"	0.064	0.949
38	OFLOWMN_FPS.res	0 - 1	0.001	0.6348	Reemplazo	Flujo de salida mínimos diarios del mes	-0.187	0.852
21	PND_ESA.pnd	0 - 30	8	10.1165	Reemplazo	Superficie del estanque cuando se llena al vertedero de emergencia	-0.710	0.481
29	PND_EVOL.pnd	0 - 125	40	101.8768	Reemplazo	Volumen de agua almacenada del estanque cuando se llena hasta el vertedero de emergencia	0.512	0.611
10	PND_PSA.pnd	0 - 20	5	10.1495	Reemplazo	Superficie del estanque cuando se llena hasta el vertedero principal	1.303	0.199
4	PND_PVOL.pnd	0 - 100	25	40.506	Reemplazo	Volumen de agua necesario para llenar los estanques hasta el vertedero principal	-1.554	0.127
18	PND_VOL.pnd	0 - 100	0	9.509	Reemplazo	Volumen inicial de agua del estanque	-0.997	0.324
14	RCHRG_DP.gw	0 - 1	0.05	0.302	Reemplazo	Fracción de percolación de acuífero profundo (adimensional)	1.076	0.287
47	RES_ESA.res	-0.1 - 0.1	258.8	0.011	Relativo	Superficie del embalse cuando el embalse está lleno hasta el vertedero de emergencia	0.066	0.947
16	RES_EVOL.res	15 - 3000	3000	1462.725	Reemplazo	Volumen de agua necesario para llenar el embalse hasta el vertedero de emergencia	-1.040	0.304

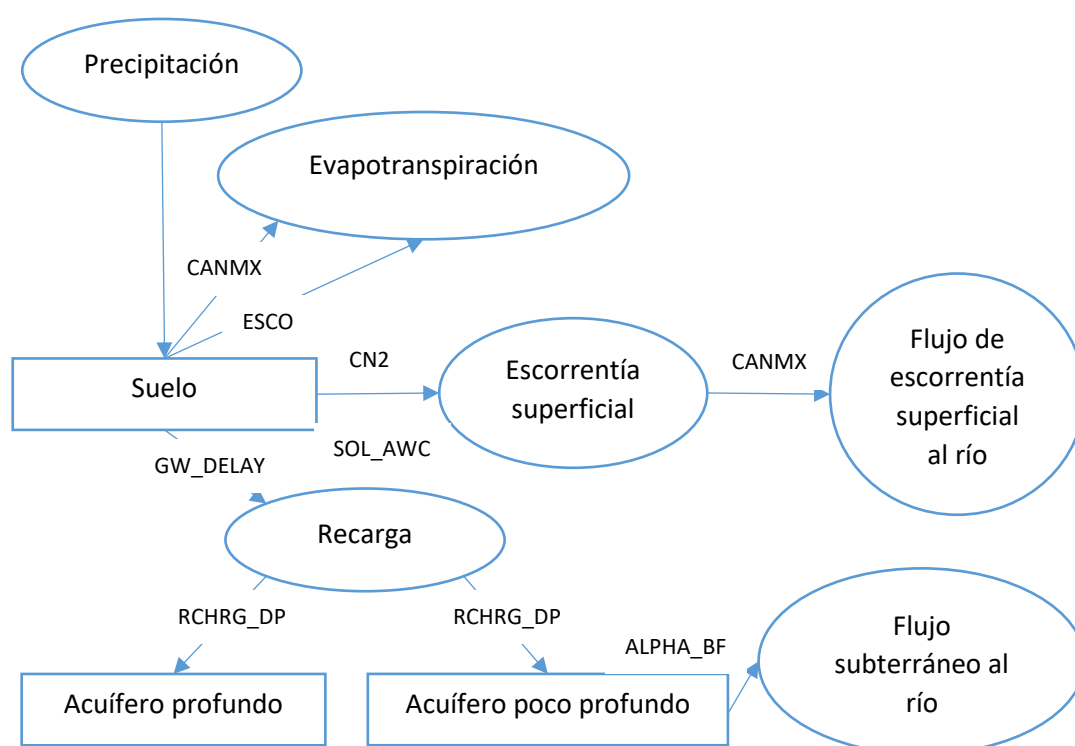
51	RES_PSA.res	-0.1 - 0.1	194	-0.089	Relativo	Superficie del embalse cuando el embalse se llena hasta el vertedero principal	-0.003	0.997
13	RES_PVOL.res	10 - 100	100	24.85	Reemplazo	Volumen de agua necesario para llenar el embalse hasta el vertedero principal	-1.100	0.277
43	RES_RR.res	0.5 - 7.9	2.3	0.537	Reemplazo	Tasa media diaria de liberación del vertedero principal. Necesario si "Opción de simulación de salida" = "Tasa media de liberación anual"	0.112	0.911
11	RES_VOL.res	10 - 100	100	86.05	Reemplazo	Volumen inicial del embalse	1.167	0.249
41	REVAPMN.gw	0 - 500	750	112.5077	Reemplazo	Umbral de profundidad del agua en el acuífero poco profundo para que se produzca un "revap" (mm)	-0.129	0.898
7	SFTMP.bsn	0 - 5	1	3.6277	Reemplazo	Temperatura de las nevadas (°C)	1.373	0.176
17	SHALLST.gw	0 - 1000	1000	55.0094	Reemplazo	Profundidad inicial del agua en el acuífero poco profundo (mm)	-1.016	0.315
30	SMFMN.bsn	0 - 10	4.5	1.4585	Reemplazo	Tasa mínima de derretimiento de la nieve durante el año (se produce en el solsticio de invierno)	0.460	0.647
3	SMFMX.bsn	0 - 10	4.5	5.9541	Reemplazo	Tasa máxima de derretimiento de la nieve durante el año (se produce en el solsticio de verano)	-1.771	0.083
31	SMTMP.bsn	0 - 5	0.5	2.031	Reemplazo	Temperatura de la base de derretimiento de nieve (°C)	-0.455	0.651
39	STARG_FPS.res	0 - 1	0.5	0.64	Reemplazo	Volumen objetivo como fracción del 'volumen al vertedero principal'	0.173	0.863
46	SURLAG.bsn	1 - 24	4	20.435	Reemplazo	Tiempo de retraso de escorrentía superficial	-0.067	0.946
23	TIMP.bsn	0 - 1	1	0.7476	Reemplazo	Factor de retardo de la temperatura del paquete de nieve (adimensional)	-0.672	0.505
20	TLAPS.sub	-10 - 10	0	-5.5	Reemplazo	Tasa de lapso de temperatura (adimensional)	-0.713	0.479
9	WET_MXSA.pnd	0 - 30	0	21.1795	Reemplazo	Superficie de los humedales al máximo nivel de agua	-1.361	0.180
5	WET_MXVOL.pnd	0 - 125	0	89.3778	Reemplazo	Volumen de agua almacenada en humedales cuando se llena al nivel máximo de agua	1.508	0.138
33	WET_NSA.pnd	0 - 20	0	16.7165	Reemplazo	Superficie de los humedales al nivel normal del agua	0.333	0.741

34	WET_NVOL.pnd	0 - 100	0	79.5021	Reemplazo	Volumen de agua almacenada de los humedales cuando se llena a nivel normal de agua	0.331	0.742
40	WET_VOL.pnd	0 - 100	100	97.5003	Reemplazo	Volumen inicial de agua en los humedales	0.143	0.887
42	WURTNF.res	0 - 1	0	0.744	Reemplazo	Fracción de agua extraída del depósito a través de WURESN que se devuelve y se convierte en flujo fuera del embalse	-0.115	0.909

Nota. Reemplazo: Cambio del valor original por el calibrado. Relativo: Multiplicación del valor original el calibrado.

Se observa que, para el área de estudio, y en general para los andes peruanos, los parámetros más sensibles son los referentes a derretimiento de nieves y comportamiento del flujo subterráneo.

Figura 51.
Selección de ocho parámetros en la calibración SWAT



Nota. Adaptado de Guse et al., 2013.

Tabla 33.
Resumen estadístico de valores de NSE y PBIAS reportados en literaturas variadas

TIPO	ESTADÍSTICO	CALIBRACIÓN				VALIDACIÓN			
		NSE		PBIAS		NSE		PBIAS	
		DIARIO	MENSUAL	DIARIO	MENSUAL	DIARIO	MENSUAL	DIARIO	MENSUAL
Caudal	n	92	33	72	0	128	70	82	0

Mínimo	-0.23	0.14	-91.70	na	-1.81	-3.35	-155.60	na
Máximo	0.95	0.91	26.50	na	0.89	0.93	47.18	na
Mediana	0.89	0.79	-1.30	na	0.67	0.63	-1.90	na

Nota. n = Número de reportes (tamaño de muestra), NSE = Nash-Sutcliffe, PBIAS = Sesgo porcentual, na = no disponible (usado cuando n = 0). Reproducido de D. N. Moriasi et al., 2017.

Tabla 34.

Calificaciones reportadas para Nash-Sutcliffe (NSE) en literaturas varias

MODELO	VALOR	CALIFICACIÓN	FASE DEL MODELO	REFERENCIA
SWAT	> 0.65	Muy buena	Calibración y validación	Saleh et al. (2000)
SWAT	0.54 a 0.65	Adecuada	Calibración y validación	Saleh et al. (2000)
SWAT	> 0.50	Satisfactoria	Calibración y validación	Santhi et al. (2001); adaptado por Bracmort et al. (2006)
SWAT y HSPF	> 0.65	Satisfactoria	Calibración y validación	Singh et al. (2004); adaptado por Narasimhan et al. (2005)

Nota. Reproducido de D. N. Moriasi et al., 2017.

Tabla 35

Calificaciones reportadas para PBIAS en literaturas varias

MODELO	VALOR	CALIFICACIÓN	FASE DEL MODELO	REFERENCIA
SWAT	< 15%	Satisfactoria	Calibración del flujo	Santhi et al. (2001)
SWAT	< 20%	Satisfactoria	Para sedimentos después de la calibración del flujo	Santhi et al. (2001)
SWAT	< 25%	Satisfactoria	Para nitrógeno después de la calibración del flujo y sedimentos	Santhi et al. (2001)
SWAT	20%	Satisfactoria	Calibración y validación	Bracmort et al. (2006)
SWAT	< 10%	Muy buena	Calibración y validación	Van Liew et al. (2007)
SWAT	< 10% a < 15%	Buena	Calibración y validación	Van Liew et al. (2007)
SWAT	< 15% a < 25%	Satisfactoria	Calibración y validación	Van Liew et al. (2007)
SWAT	> 25%	Insatisfactoria	Calibración y validación	Van Liew et al. (2007)

Nota. Reproducido de D. N. Moriasi et al., 2017.

4.1.2.3 Resultados y corroboración de la calibración y validación.

Se obtuvieron los siguientes primeros resultados para la etapa de calibración (1984 - 1992):

- P-factor: 0.74
- R-factor: 0.90
- R2: 0.75
- Nash-Sutcliffe (NSE): 0.70
- PBIAS: +14.9%
- Promedio del caudal: 2.03 m³/s (simulado) vs 2.39 (observado)
- Desviación estándar del caudal: 1.70 m³/s (simulado) vs 2.48 m³/s (observado)

Se obtuvieron los siguientes primeros resultados para la etapa de validación (1993 - 2001):

- R2: 0.36
- Nash-Sutcliffe (NSE): 0.27
- PBIAS: 18.34%
- Promedio del caudal: 2.45 m³/s (simulado) vs 3.00 (observado)
- Desviación estándar del caudal: 2.05 m³/s (simulado) vs 2.51 m³/s (observado)

Tabla 36

Coefficientes de correlación obtenidos en la etapa de calibración en la Est. Río Blanco

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	NOMBRE	VALOR	OBSERVACIÓN
R ²	Coef. de correlación de momento del producto Pearson (coef. de determinación)	0.75	Muy bueno: 1.0-0.7; Bueno: 0.7-0.6; Satisfactorio: 0.6-0.5; Insatisfactorio: 0.5-0.0
NSE	Coef. de eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.70	Muy bueno: 1.00-0.75; Bueno: 0.75-0.65; Satisfactorio: 0.65-0.50; Insatisfactorio: 0.5- $-\infty$
PBIAS	Coef. de Porcentaje de sesgo (percent bias)	+14.90%	Muy bueno: <10%; Bueno: 10-15%; Satisfactorio: 15-25%; Insatisfactorio: >25%

Nota. Los valores considerados como satisfactorios para un modelo SWAT fueron extraídos del estudio “Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand” de W. Me, J. M. Abell, y D. P. Hamilton. Obtenido de D. N. Moriasi et al., 2017.

Figura 52.

Comparación visual entre caudales simulados (rojo) y observados (azul) luego de 500 simulaciones en la etapa de calibración con el software SWATCUP en la Est. Río Blanco.

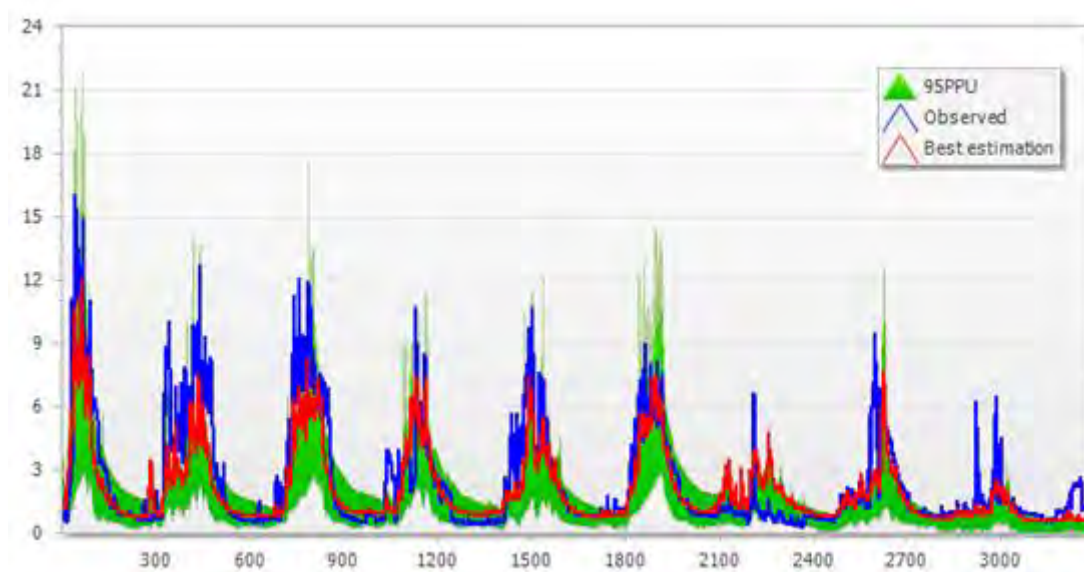


Figura 53.

Calibración y validación diaria con el modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Rímac en la Est. Río Blanco.

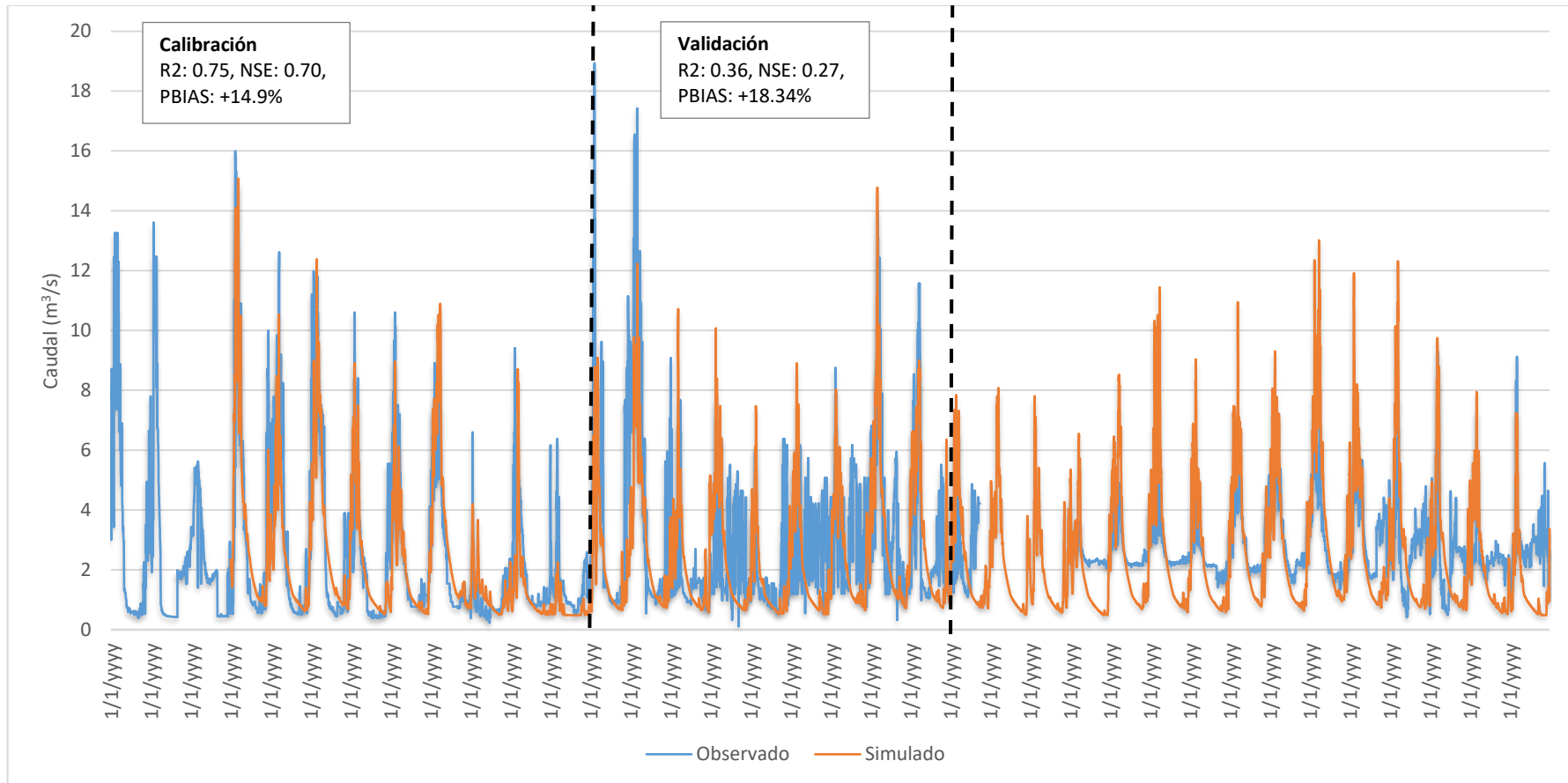


Figura 54.

Calibración y validación mensual con el modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Rímac en la Est. Río Blanco.

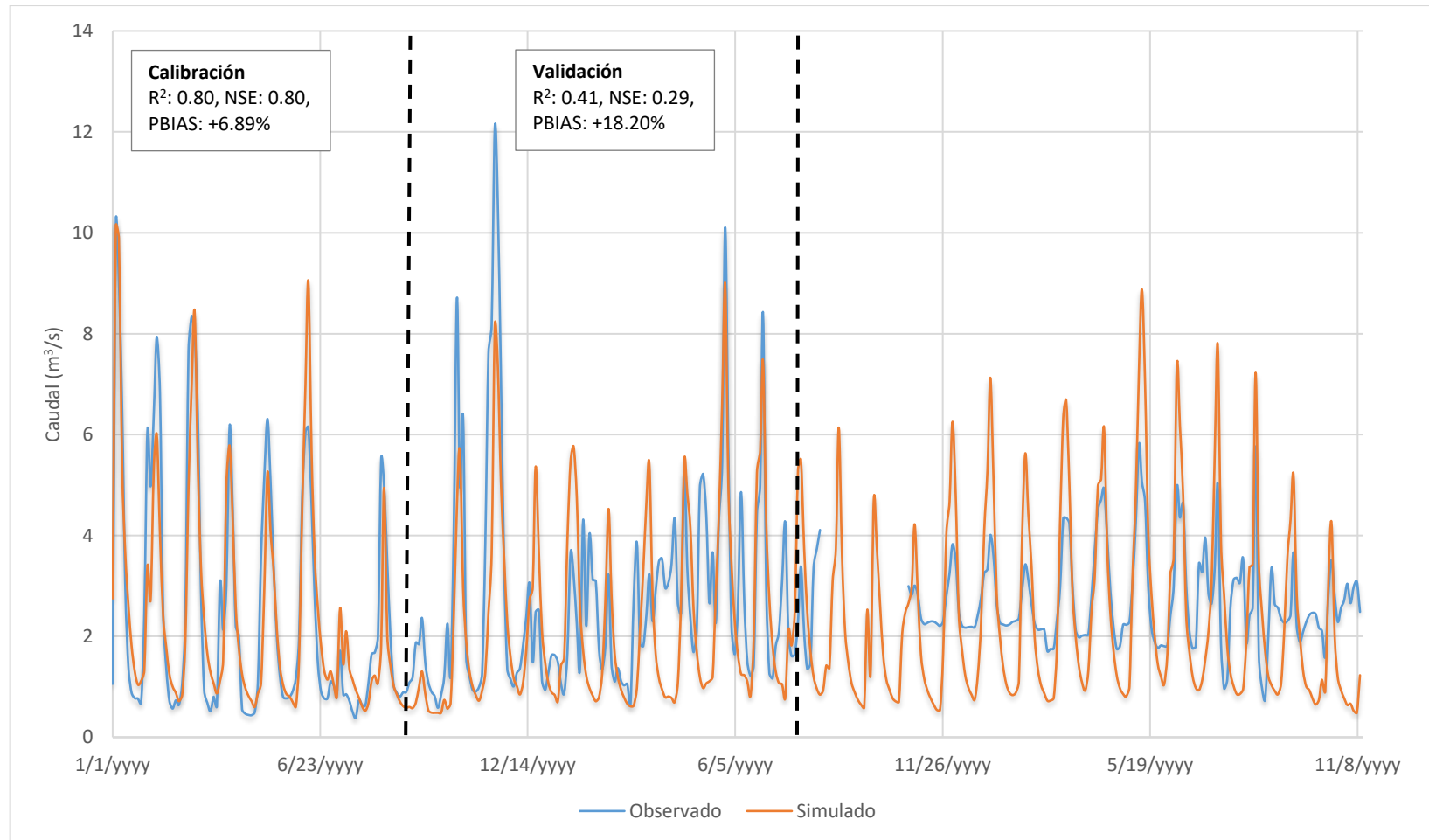
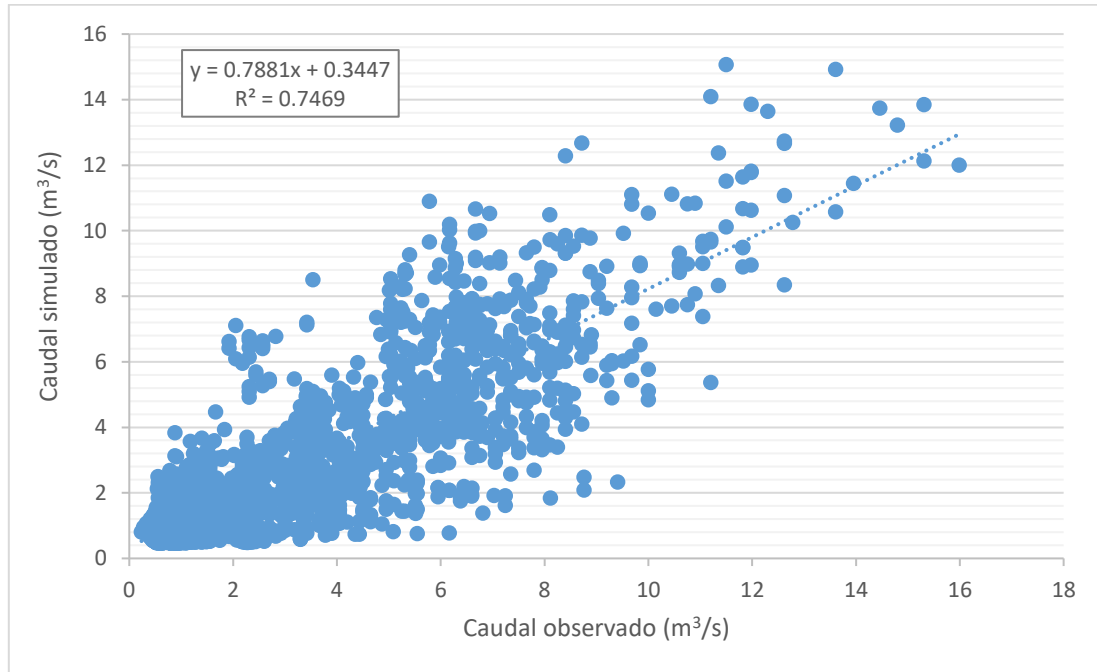


Figura 55.

Correlación lineal entre los caudales simulados (calibrados) y observados (aforos) en la Est. Río Blanco con el modelo SWAT.

**Figura 56.**

Correlación lineal entre los caudales simulados (validados) y observados (aforos) en la Est. Río Blanco con el modelo SWAT.

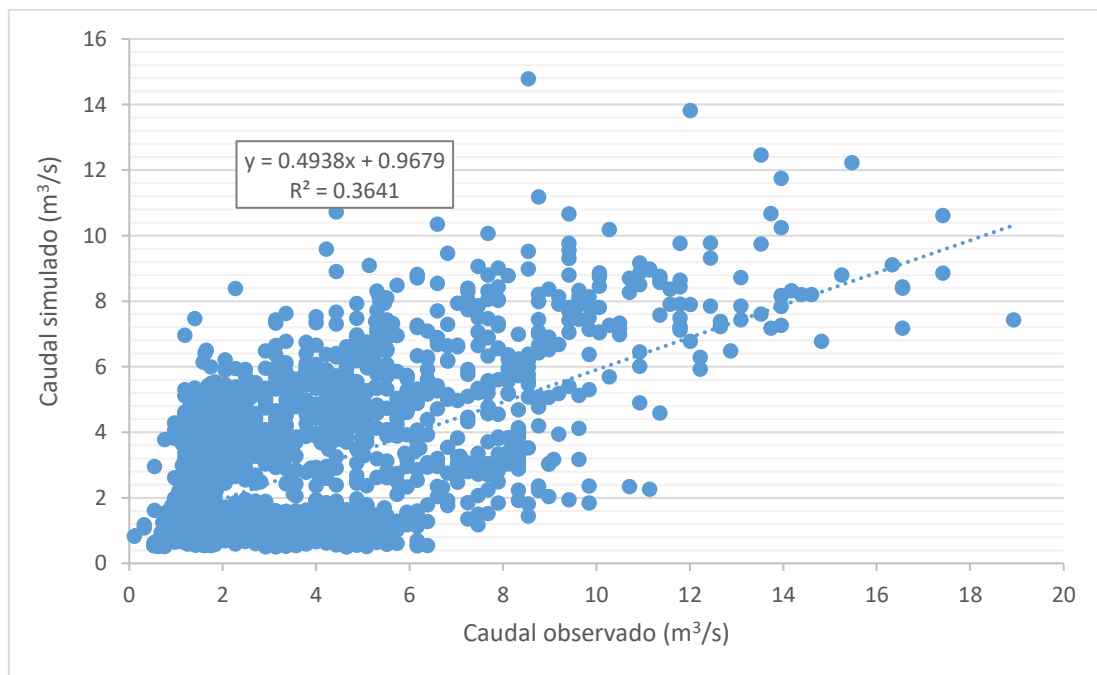
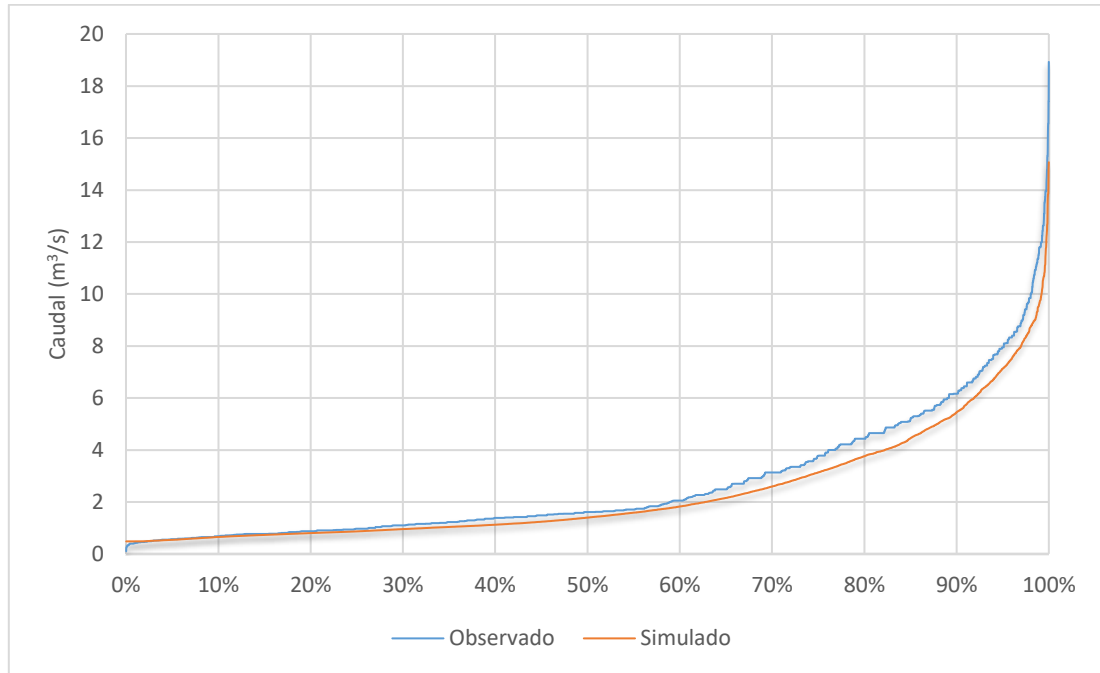
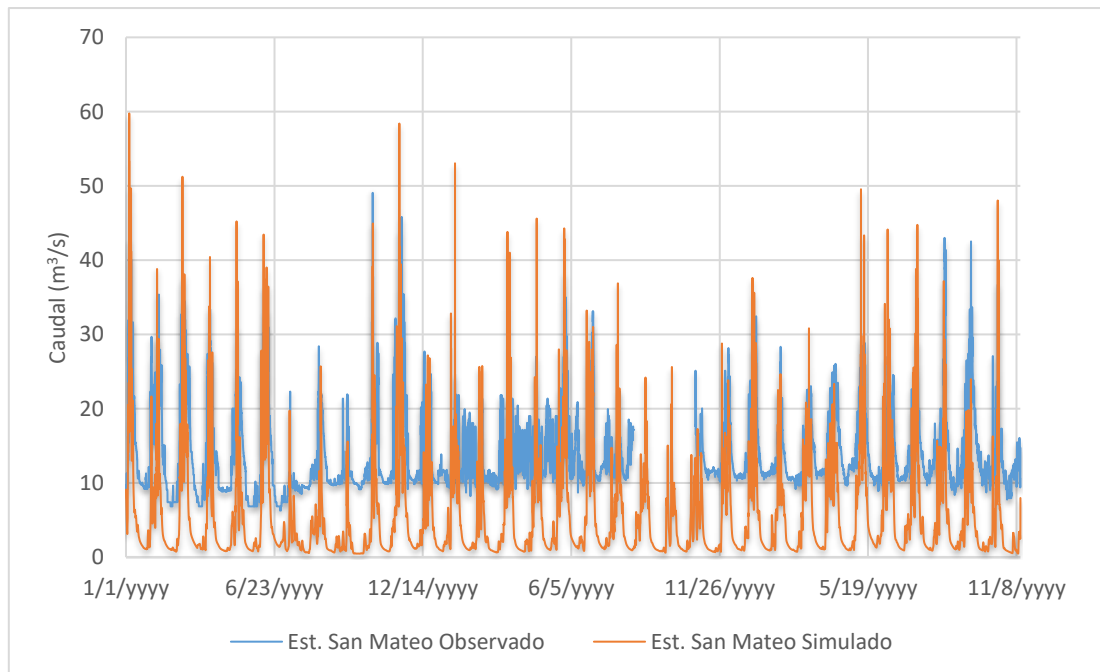


Figura 57.

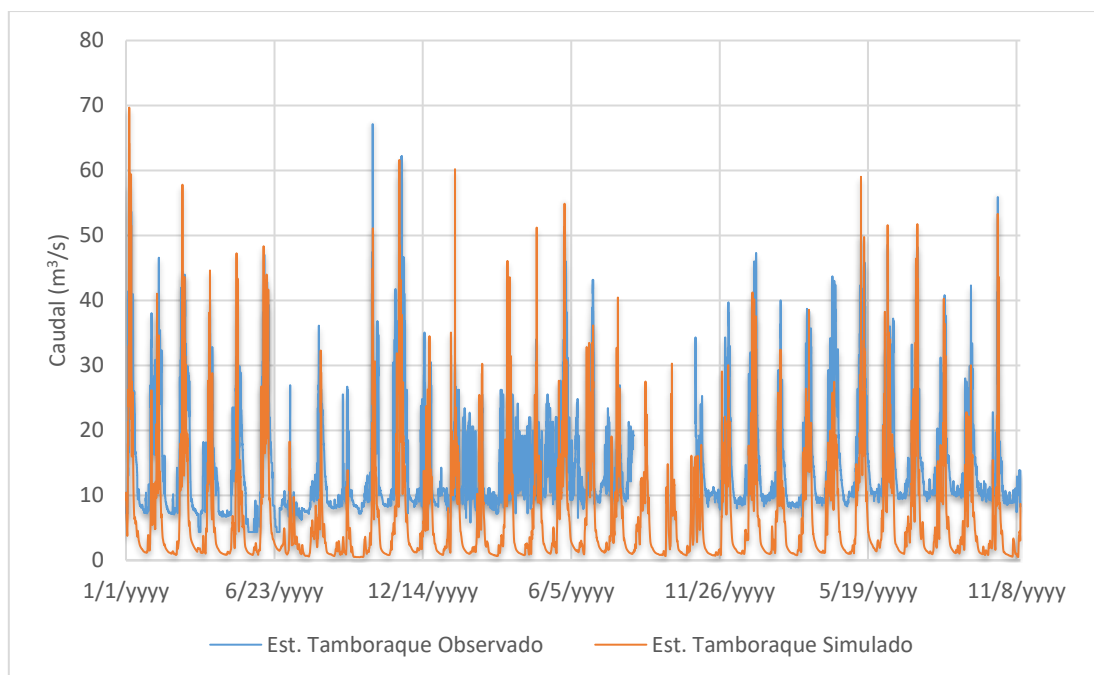
Curva frecuencia de duración diaria del caudal simulado vs. observado en la Est. Río Blanco con el modelo SWAT.

**Figura 58.**

Comparación visual entre el caudal simulado y observado en la Est. San Mateo con el modelo SWAT.

**Figura 59.**

Comparación visual entre el caudal simulado y observado en la Est. Tamboraque con el modelo SWAT.



4.1.3 Validación adicional con el modelo hidrológico RS Minerve

En esta sección se correrá el modelo hidrológico RS Minerve de Crealp e HydroCosmos SA con los submodelos de SOCONT y HBV con las mismas variables de entrada de las secciones anteriores como una comparación entre modelos. Se espera obtener resultados similares y se debatirán las diferencias obtenidas.

4.1.3.1 Variables de entrada, configuración, calibración y validación.

Se utilizó exactamente las mismas estaciones meteorológicas detalladas en el punto “4.2.3 Variables de entrada meteorológicas”, es decir, 12 estaciones distribuidas en el área de estudio y alrededores con fuente en el producto grillado PISCO (SENAMHI, 2017) y que están mostrados en el “Mapa 14. Mapa de estaciones meteorológicas e hidrométricas” (figura 38).

La mayoría de los parámetros iniciales fueron obtenidos de la tesis “Análisis y evaluación comparativa de modelos hidrológicos agrupados y semidistribuidos aplicados al pronóstico de caudales diarios del río Chillón” (Astoraime M., 2017) por ser la cuenca justamente vecina al área de estudio.

Todos los submodelos presentes en el software RS Minerve requieren de las variables de precipitación y temperatura, y algunos como HBV de evapotranspiración potencial, aunque este último puede ser estimado con algunas ecuaciones integradas en el software (Turc, McGuinness y Oudin)

De igual manera la calibración del modelo fue con la Est. Hidrométrica de Río Blanco y se corroboró con las estaciones de San Mateo y Tamboraque.

Se optó seguir con los mismos periodos y parámetros usados SWAT en la medida de lo posible. Por ejemplo, en RS Minerve no existe la opción de “años para recarga del acuífero”, entonces muestra resultados simulados desde le primer año.

Datos de la configuración:

- Currency: PEN (Sol peruano)
- Evapotranspiration: mm/d
- Precipitation: mm/d
- Spatial interpolation method: Shepard
- Evapotranspiration: Oudin
- Latitud: -12
- Longitud: -76

Datos del reservorio (embalse Yuracmayo):

- H1: 4285.141 (msnm), Vol1: 248500 (m3)
- H2: 4290.590 (msnm), Vol2: 14627250 (m3)

- HIni: 4287.5 (msnm)

Datos del H-Q (embalse Yuracmayo):

- H1: 4285.141 (msnm), Q1: 0.4 (m3/s)
- H2: 4290.590 (msnm), Q2: 8.0 (m3/s)

Tabla 37.

Parámetros inicialmente configurados en el modelo RS Minerve (cuenca Chillón)

SUB-MODELO	PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
SOCONT	S	10.229	mm/°C/día	Coefficiente de derretimiento de nieve °C x día referencial
	ThetaCri	0.1	-	Contenido crítico de agua relativa al paquete de nieve
	bp	0.019	s/m	Coefficiente de fusión debido a la precipitación líquida
	HGR3Max	435.34	mm	Altura máxima del reservorio de infiltración
	KGR3	0.00025	1/s	Coefficiente de liberación del reservorio de infiltración
	L	70000	mm	Ancho del plano
	J0	0.099	-	Pendiente de escorrentía
	Kr	19.997	m1/3/s	Coefficiente de Strickler
HBV	CFMax	9.213	mm/°C/día	Factor de fusión
	CFR	1	-	Factor de congelación
	CWH	0.1	-	Contenido crítico de agua relativa al paquete de nieve
	TT	2.99	°C	Umbral de temperatura de lluvia / nieve
	TTInt	2.96	°C	Intervalo de temperatura para la mezcla de lluvia / nieve
	TTSM	0	°C	Umbral de temperatura para el derretimiento de nieve
	Beta	1	-	Parámetro del modelo (coeficiente de forma)
	FC	578.752	mm	Máximo almacenamiento del suelo

	PWP	499.96	mm	Umbral de punto de marchitamiento permanente del suelo
	SUMax	85.844	mm	Umbral superior del nivel de agua del embalse
	Kr	0.432	1/d	Coefficiente de almacenamiento del flujo de superficie cercano
	Ku	0.042	1/d	Coefficiente de almacenamiento entre flujos
	Kl	0	1/d	Coefficiente de almacenamiento de flujo base
	Kperc	0.051	1/d	Coefficiente de almacenamiento de percolación

Datos de calibración y validación del modelo:

- Función objetivo (OF):
 - Nash: 0.4
 - Pearson Correlation Coeff: 0.3
 - Relative Volume Bias: 0.3
- Algorithm parameters: SCE-UA
- Fecha de calibración: 1ro de enero de 1981 al 31 de diciembre del 1992
- Fecha de validación: 1ro de enero de 1993 al 31 de diciembre del 2001

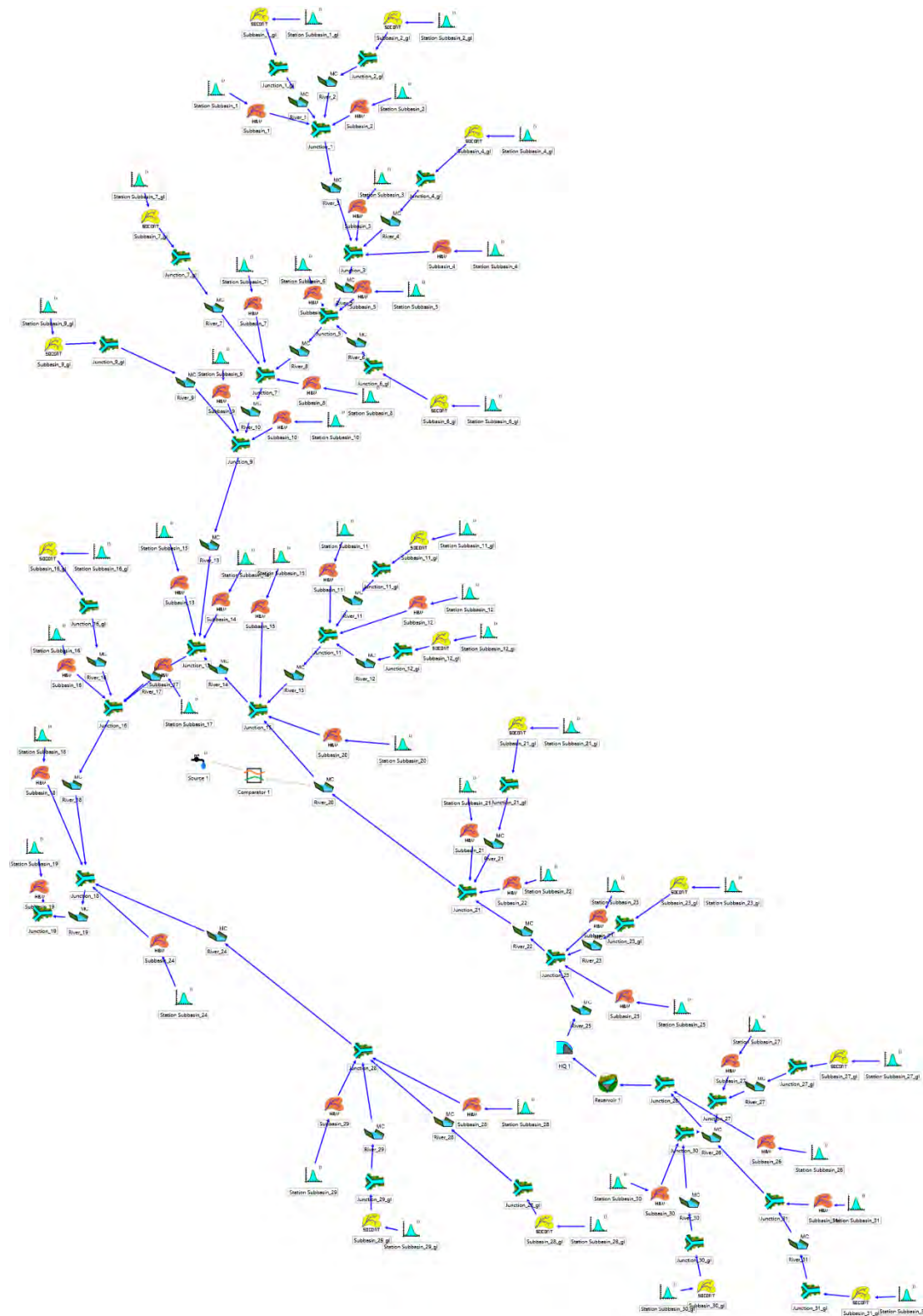
Tabla 38.

Rango de parámetros de calibración en el modelo RS Minerve

SUB-MODELO	PARAMETROS	VALORES	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
	HGR3Max	0 - 2000	mm	Altura máxima del reservorio de infiltración
SOCNT	KGR3	0.00025 – 0.1	1/s	Coefficiente de liberación del reservorio de infiltración
	Kr	0.1 - 90	m ^{1/3} /s	Coefficiente de Strickler

HBV	Ku	0.01 – 0.4	1/d	Coefficiente de almacenamiento entre flujos
	Kperc	0 – 0.8	1/d	Coefficiente de almacenamiento de percolación

Figura 60.
Modelo final en RS Minerve.



4.1.3.2 Resultados.

Luego de un extenso procesamiento de cómputo el software logró encontrar los parámetros adecuados para validar el modelo, es decir, que los caudales simulados en gabinete

con el modelo son similares a los observados en campo (aforos). A continuación, se detallan los parámetros y coeficientes de correlación obtenidos.

Tabla 39.

Parámetros de calibración en el modelo RS Minerve

SUB-MODELO	PARAMETROS	VALORES	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
SOCONT	HGR3Max	0.5845272	mm	Altura máxima del reservorio de infiltración
	KGR3	0.0855752	1/s	Coefficiente de liberación del reservorio de infiltración
	Kr	48.3711934	m ¹ /3/s	Coefficiente de Strickler
HBV	Ku	0.2793354	1/d	Coefficiente de almacenamiento entre flujos
	Kperc	0.0997417	1/d	Coefficiente de almacenamiento de percolación

Tabla 40.

Coefficientes de correlación en la etapa de calibración en la Est. Río Blanco en el modelo RS Minerve

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	NOMBRE	VALOR	OBSERVACIÓN
R ²	Coef. de correlación de momento del producto Pearson (coef. de determinación)	0.86	Muy bueno: 1.0-0.7 ; Bueno: 0.7-0.6; Satisfactorio: 0.6-0.5; Insatisfactorio: 0.5-0.0
NSE	Coef. de eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.71	Muy bueno: 1.00-0.75; Bueno: 0.75-0.65 ; Satisfactorio: 0.65-0.50; Insatisfactorio: 0.5- -∞
PBIAS	Coef. de Porcentaje de sesgo (percent bias)	-15.41%	Muy bueno: <10%; Bueno: 10-15%; Satisfactorio: 15-25% ; Insatisfactorio: >25%

Nota. Los valores considerados como satisfactorios para un modelo SWAT fueron extraídos del estudio “Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand” de W. Me, J. M. Abell, y D. P. Hamilton.

Tabla 41.

Coefficientes de correlación en la etapa de validación en la Est. Río Blanco obtenidos en el modelo RS Minerve

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	NOMBRE	VALOR	OBSERVACIÓN
----------------------------	--------	-------	-------------

R ²	Coef. de correlación de momento del producto Pearson (coef. de determinación)	0.35	Muy bueno: 1.0-0.7; Bueno: 0.7-0.6; Satisfactorio: 0.6-0.5; Insatisfactorio: 0.5-0.0
NSE	Coef. de eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.15	Muy bueno: 1.00-0.75; Bueno: 0.75-0.65 ; Satisfactorio: 0.65-0.50; Insatisfactorio: 0.5- -∞
PBIAS	Coef. de Porcentaje de sesgo (percent bias)	23.71%	Muy bueno: <10%; Bueno: 10-15%; Satisfactorio: 15-25% ; Insatisfactorio: >25%

Nota. Los valores considerados como satisfactorios para un modelo SWAT fueron extraídos del estudio “Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand” de W. Me, J. M. Abell, y D. P. Hamilton.

Figura 61.

Comparación visual entre caudales simulados (mostaza) y observados (verde) en la etapa de calibración en la Est. Río Blanco en el modelo RS Minerve.

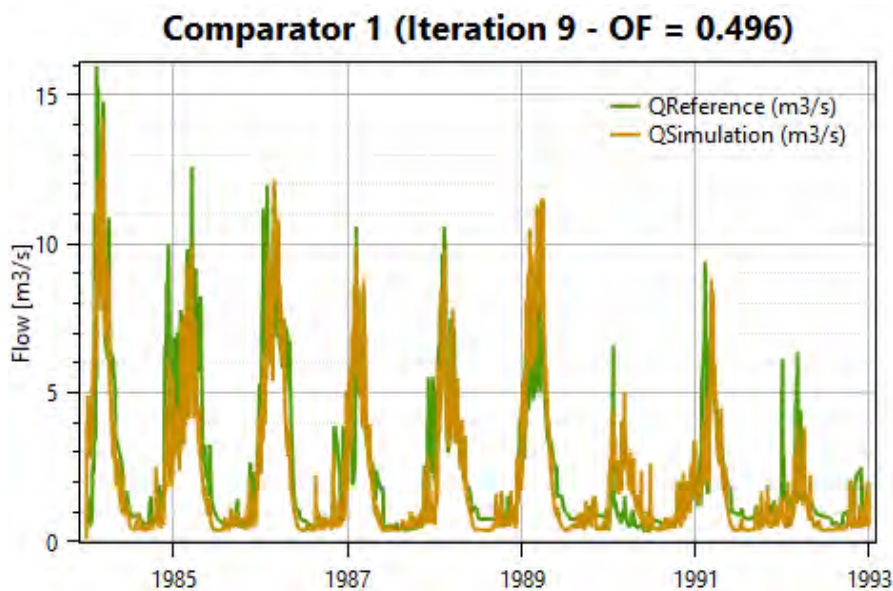


Figura 62.

Comparación visual entre caudales simulados (mostaza) y observados (verde) en la etapa de calibración y validación en la Est. Río Blanco en el modelo RS Minerve.

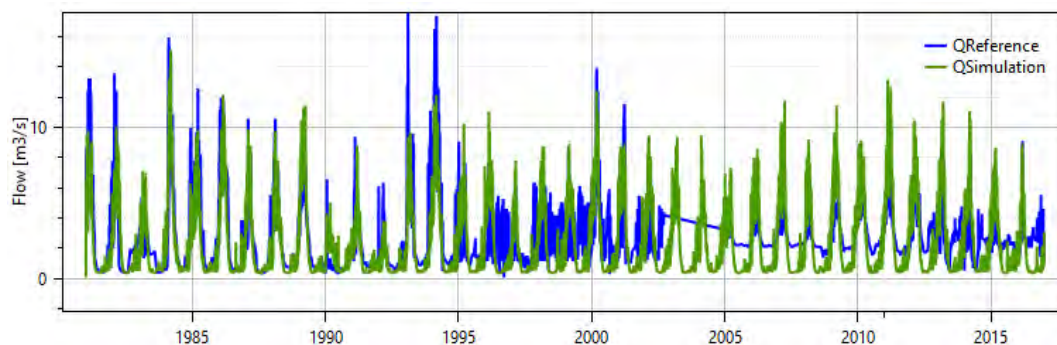


Figura 63.

Calibración y validación diaria con el modelo hidrológico RS Minerve en la cuenca alta del río Rímac en la Est. Río Blanco.

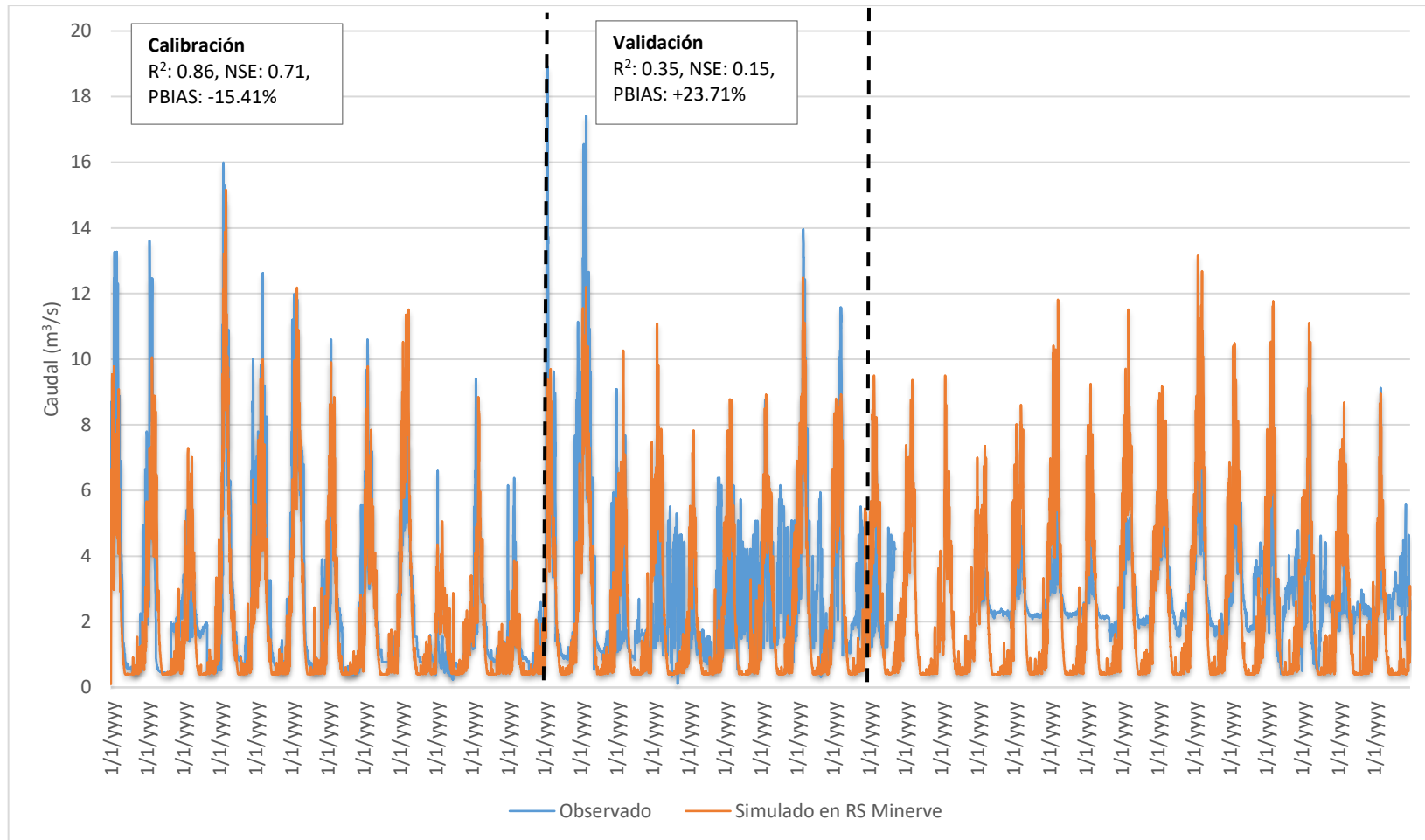


Figura 64.

Calibración y validación mensual con el modelo hidrológico RS Minerve en la cuenca alta del río Rímac en la Est. Río Blanco.

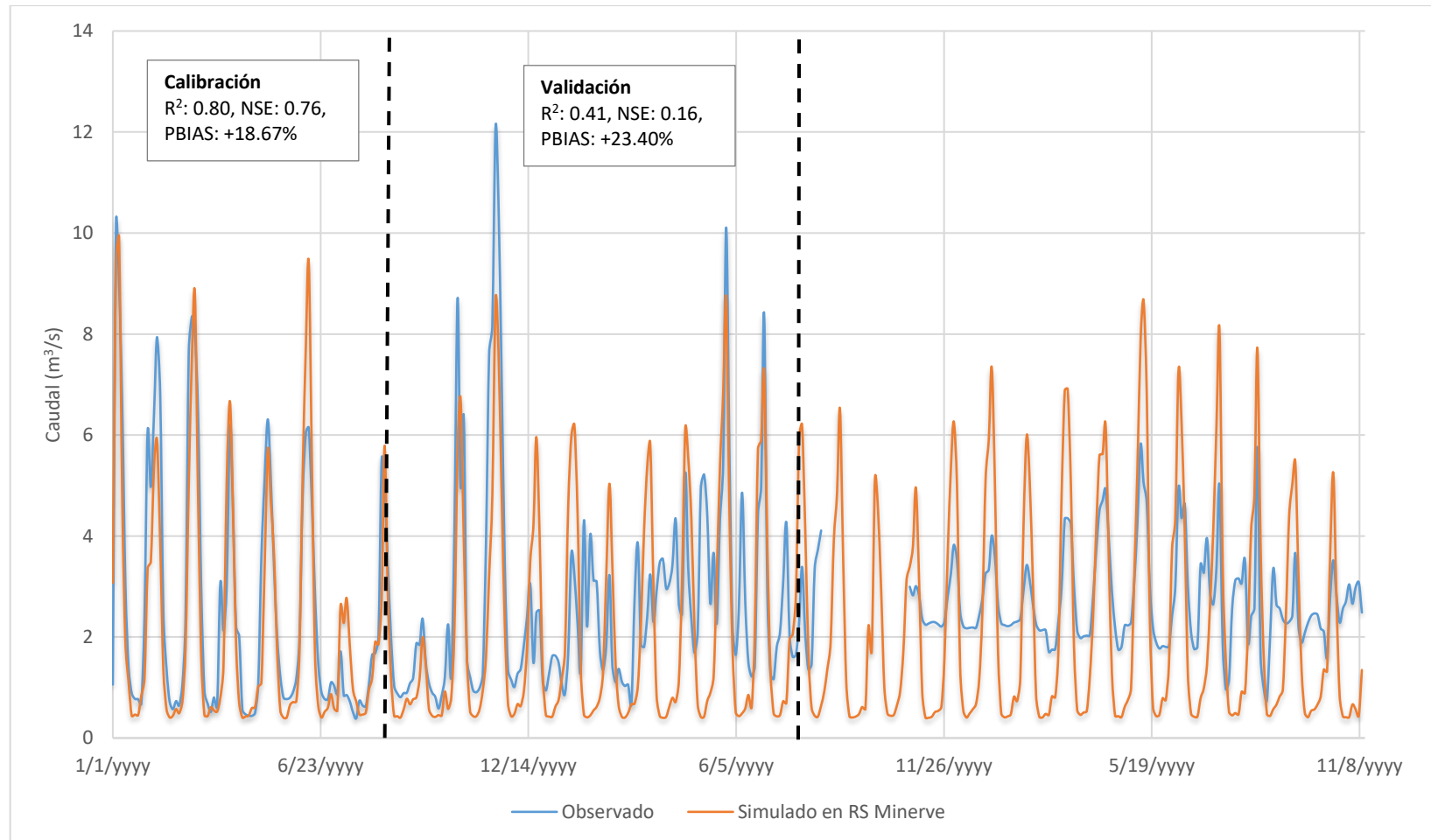
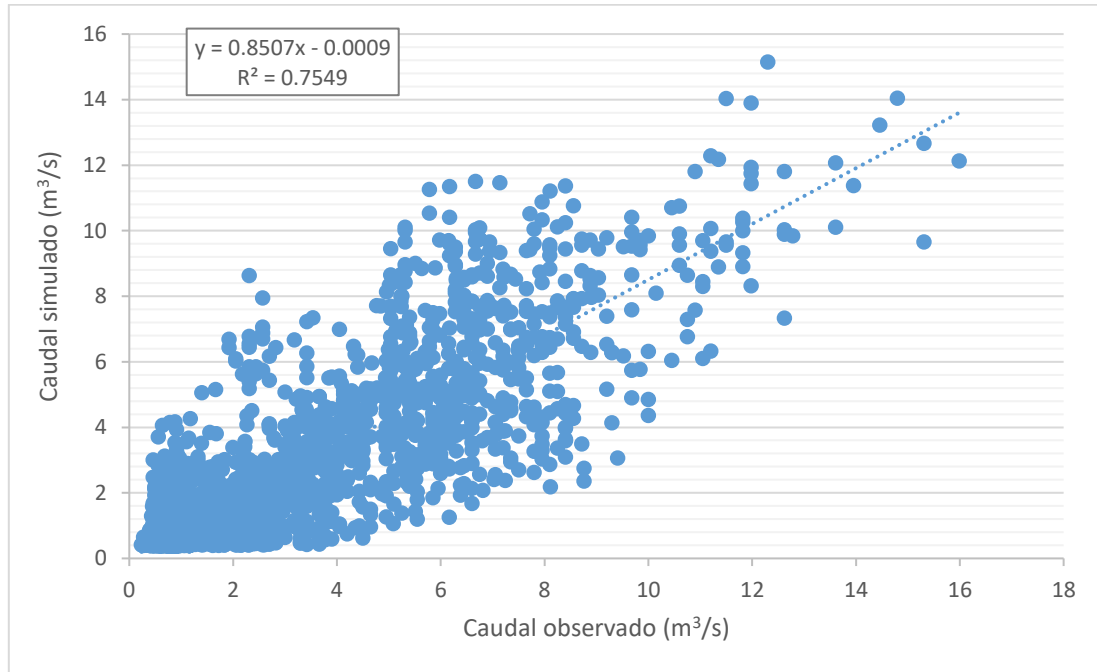


Figura 65.

Correlación lineal entre los caudales simulados (calibrados) y observados (aforos) en la Est. Río Blanco con el modelo RS Minerve.

**Figura 66.**

Correlación lineal entre los caudales simulados (validados) y observados (aforos) en la Est. Río Blanco con el modelo RS Minerve.

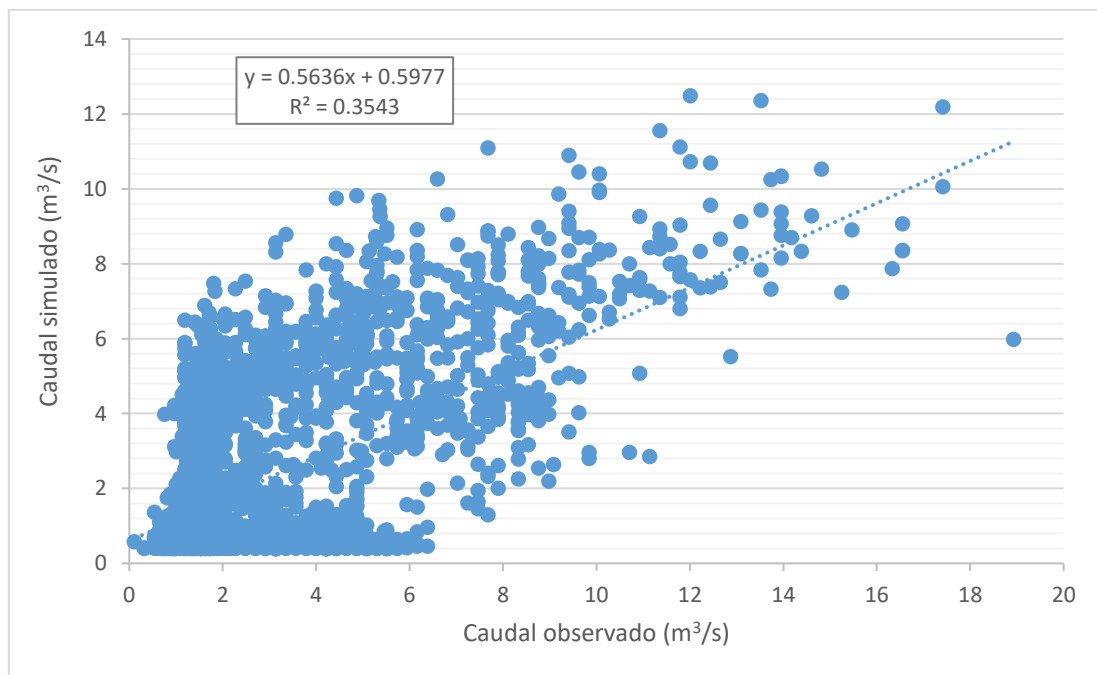
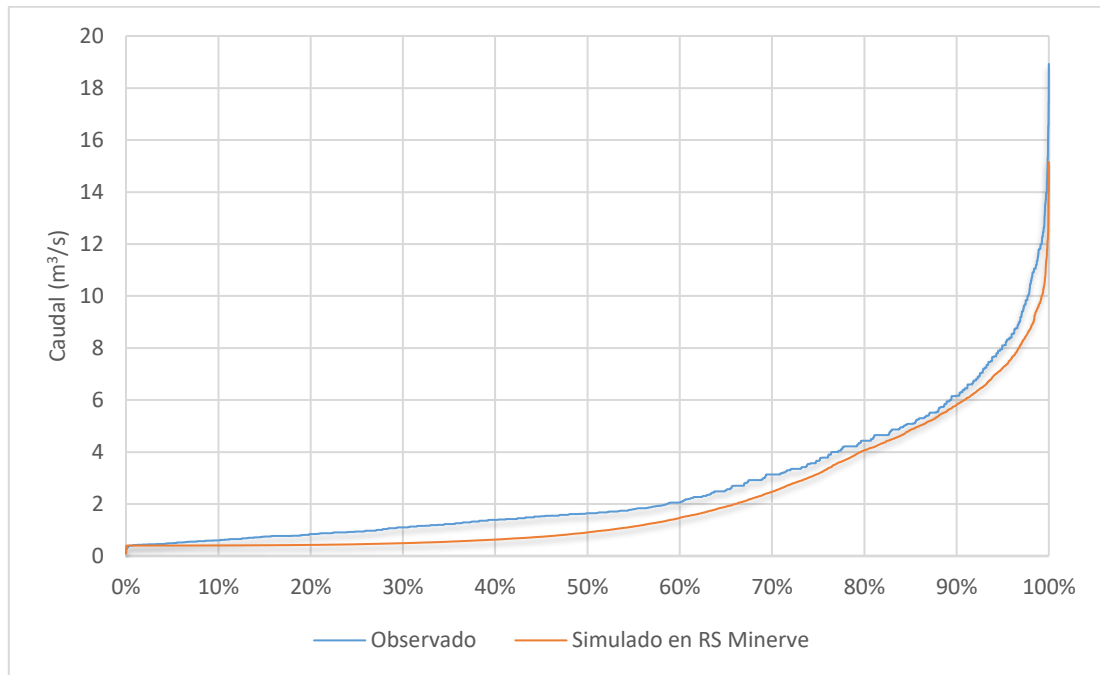
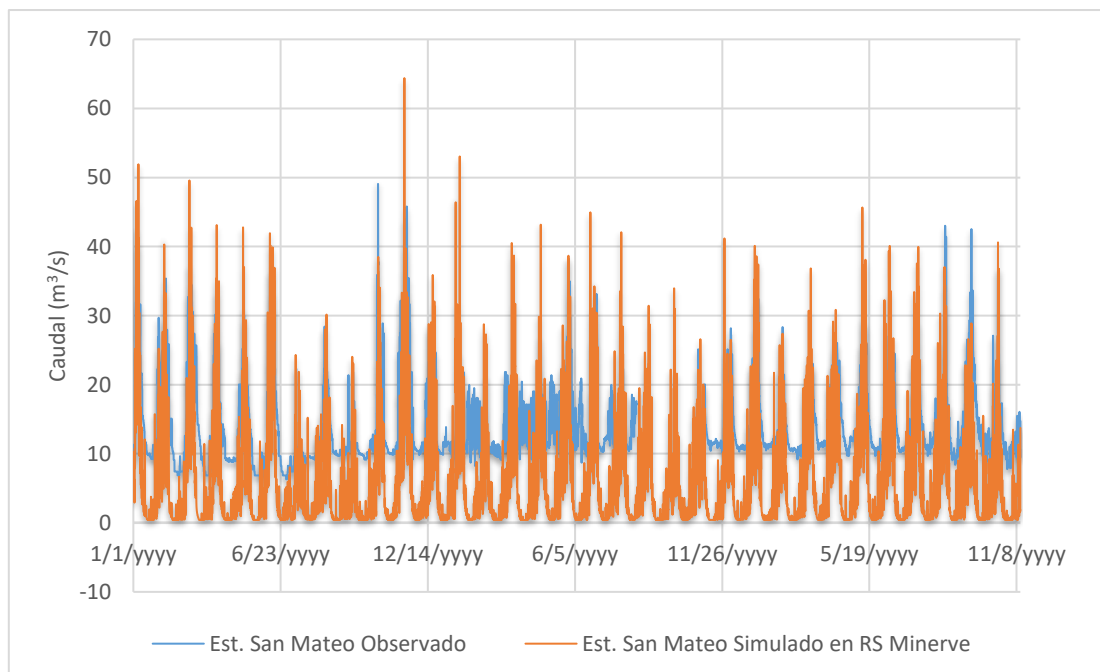


Figura 67.

Curva frecuencia de duración diaria del caudal simulado vs. observado en la Est. Río Blanco con el modelo RS Minerve.

**Figura 68.**

Comparación visual entre el caudal simulado y observado en la Est. San Mateo con el modelo RS Minerve

**Figura 69.**

Comparación visual entre el caudal simulado y observado en la Est. Tamboraque con el modelo RS Minerve

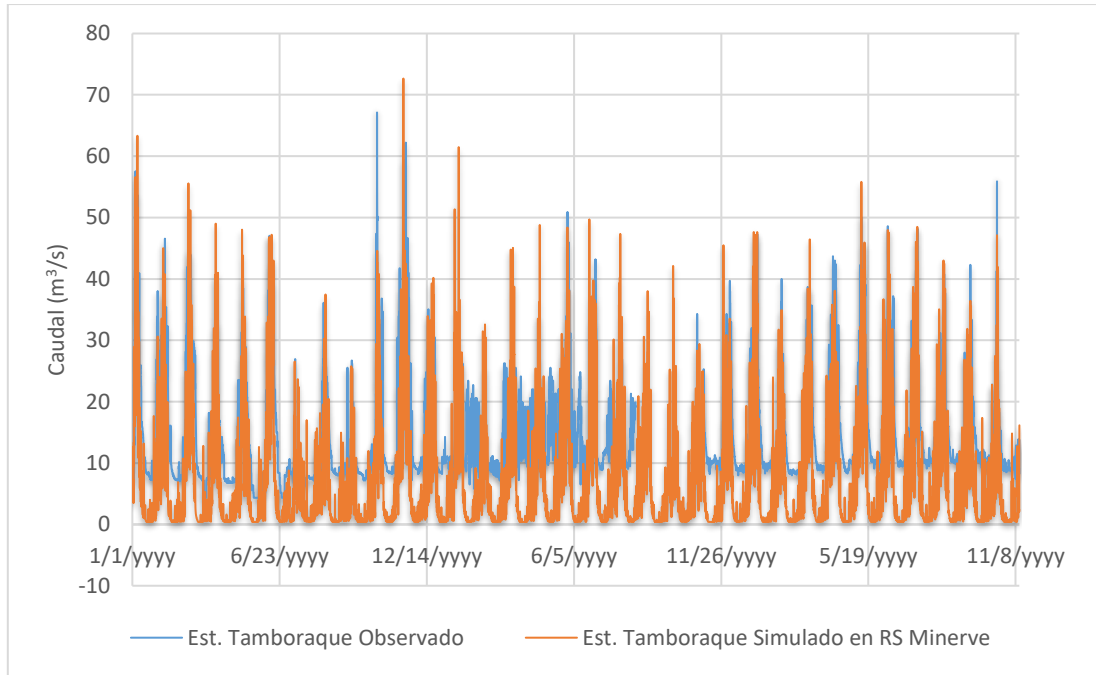


Figura 70.
Comparación de barra entre el caudal simulado por el modelo SWAT y RS Minerve por subcuenca

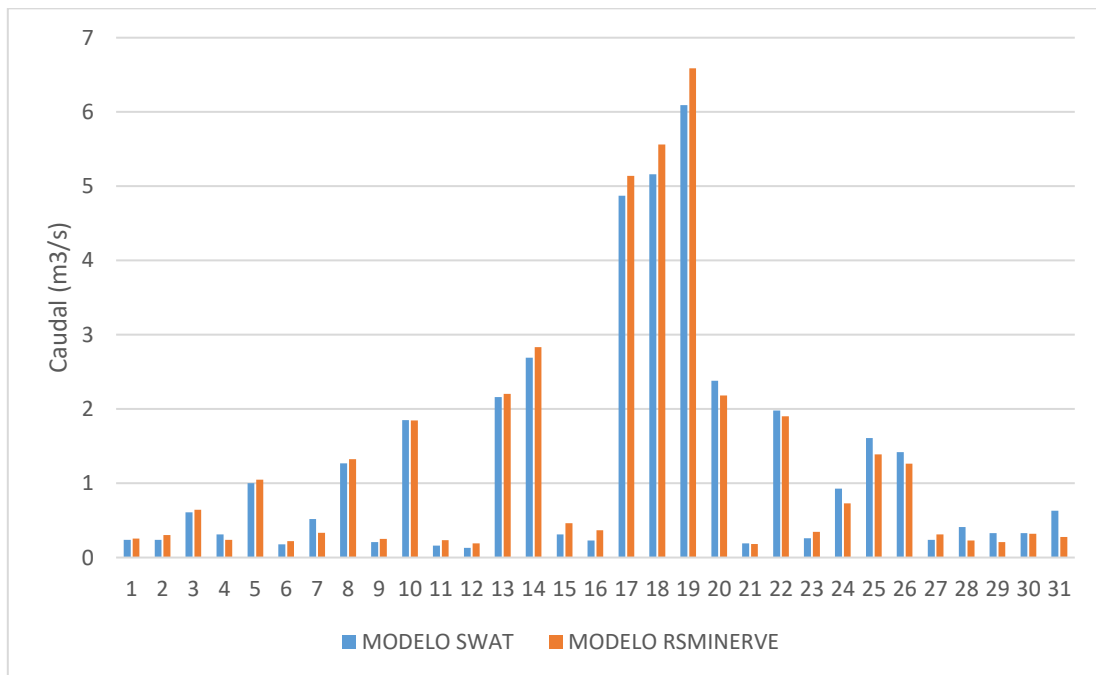
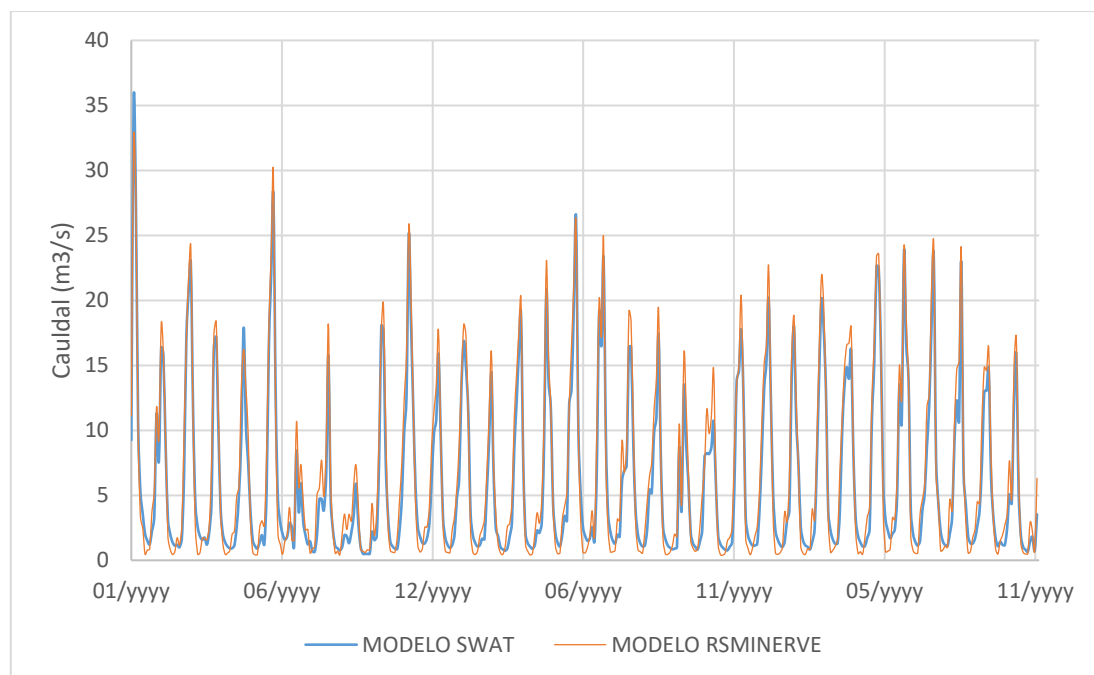


Figura 71.
Comparación entre el caudal simulado por el modelo SWAT y RS Minerve de la cuenca alta del Río Rímac



4.1.3.3 Comparación.

Los modelos hidrológicos de SWAT y RS Minerve muestran resultados similares como se esperaba. El modelo RS Minerve sigue siendo igual de válido que SWAT a pesar de ser más sencillo y rápido. Ningún modelo es mejor al otro, cada uno tiene sus ventajas y desventajas. En general, RS Minerve ofrece facilidad de configuración y uso, mientras SWAT una mayor variedad de resultados.

En el siguiente cuadro se detallan sus principales diferencias.

Tabla 42.
Comparación de los modelos hidrológicos SWTA y RS Minerve

SWAT	RS Minerve
Completo y complejo.	Específico y sencillo.
Difícil en aprender, obtener e ingresar información, y configurar.	Fácil de aprender, ingresar información y configurar.
Varias variables de entrada como suelos, cobertura vegetal, topografía, precipitación, temperatura máxima y mínima, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa y caudales. Además de información de la subcuenca.	Pocas variables de entrada, principalmente precipitación, temperatura y caudales. Además de información de la subcuenca.
Da a elegir un periodo de espera para recarga del acuífero.	No existe periodo de espera para recarga del acuífero.

Modelo pesado.	Modelo liviano a mediano.
Mucha información de la cuenca (caudales, escorrentía, flujo subterráneo, sedimentos, nieve, etc.).	Información específica, principalmente de flujo superficial.
Detallados resultados.	Resultados específicos.
Modelo semi-distribuido.	Modelo agrupado y semi-distribuido.

4.2 Estimación de caudales y sedimentos medios en actual escenario climático y de cobertura vegetal

En esta sección se detallan los resultados obtenidos con un modelo en condiciones actuales del terreno llamado “escenario base”, se identificarán y enumerarán las zonas de mayor generación de caudales y sedimentos, así como otros datos importantes.

Los sedimentos no han podido ser calibrados debido a la inexistencia de información real en el área de estudio. Sin embargo, debido a que dependen de los caudales es posible aseverar que los datos simulados serán confiables por el motivo que los caudales del modelo han sido correctamente calibrados.

A continuación, se lista los resultados obtenidos del modelo / escenario base.

Tabla 43.

Resultados medios mensuales de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio) en escenario base.

MES	PRECIPITACIÓN (mm)	CAÍDA DE NIEVE (mm)	ESCORRENTÍA SUPERFICIAL (mm)	ESCORRENTÍA LATERAL (mm)	ESCORRENTÍA (mm)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN (mm)	SEDIMENTOS (Tn/Ha)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN POTENCIAL (mm)
1	129.71	4.82	48.21	10.53	59.05	54.62	123.05	68.52
2	146.51	4.5	58.08	13.63	72.23	52.54	168.86	60.72
3	150.66	4.11	61.87	13.44	76.01	57.56	164.86	64.98
4	49.73	1.37	14.48	5.3	20.69	39.61	30.77	51.34
5	10.54	0.57	1.81	0.86	3.29	34.83	4.42	77.71
6	2.88	0.53	0.21	0.14	0.92	22.65	0.7	88.95
7	1.43	0.38	0.02	0.05	0.63	17.23	0.06	100.95
8	4.99	0.91	0.18	0.25	0.97	16.89	0.57	103.78
9	16.78	1.49	1.44	1.22	3.14	19.5	4.03	83.44
10	34.44	1.07	4.94	2.57	7.91	26.59	10.6	74.14
11	45.55	1.14	9.55	3.67	13.55	31.38	18.82	71
12	96.16	2.17	30.24	7.59	38.04	39.74	63.9	61.15

Días de “estrés” en media anual de la cuenca alta del río Rímac:

- Días de estrés hídrico: 131.02
- Días de estrés de temperatura: 291.85
- Días de estrés de nitrógeno*: 0.01
- Días de estrés de fósforo*: 0.12
- Días de estrés de aireación*: 0.00

*Valores referenciales al no estar calibrados.

Otros valores en media anual de la cuenca alta del río Rímac:

- Precipitación: 685.7 mm
- Caída de nieve: 22.95 mm
- Derretimiento de nieve: 19.40 mm
- Sublimación: 3.55 mm
- Escorrentía superficial: 229.58 mm
- Escorrentía lateral: 58.92 mm
- Agua subterránea (acuífero poco profundo): 0.86 mm
- Agua subterránea (acuífero profundo): 4.96 mm
- Resurgimiento (agua que viaja desde el acuífero poco profundo al suelo o la vegetación): 12.71 mm

- Recarga del acuífero profundo: 4.96 mm
- Recarga total del acuífero: 16.41 mm
- Escorrentía (rendimiento hídrico total): 294.62 mm
- Percolación fuera del suelo: 16.39 mm
- Evapotranspiración: 411.8 mm
- Evapotranspiración potencial: 905.2 mm
- Carga total de sedimentos: 586.41 Tn/Ha

Figura 72.

Figura de Mapa de generación de caudales por subcuenca en escenario base que muestra la distribución de generación de caudales por subcuenca, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

Tabla 44.

Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario base.

SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)	SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)
1	0.24	17	4.87
2	0.24	18	5.16
3	0.61	19	6.09
4	0.31	20	2.38
5	1.00	21	0.19
6	0.18	22	1.98
7	0.52	23	0.26
8	1.27	24	0.93
9	0.21	25	1.61
10	1.85	26	1.42
11	0.16	27	0.24

12	0.13	28	0.41
13	2.16	29	0.33
14	2.69	30	0.33
15	0.31	31	0.63
16	0.23		

Nota. La subcuena 19 es la subcuena de captación de la cuenca alta del río Rímac. Se considera el punto de captación de cada subcuena, y no su generación independiente. Por lo tanto, las subcuenas inferiores tendrán mayor caudal que las superiores.

Figura 73.
Caudal medio anual de salida por subcuena en escenario base.

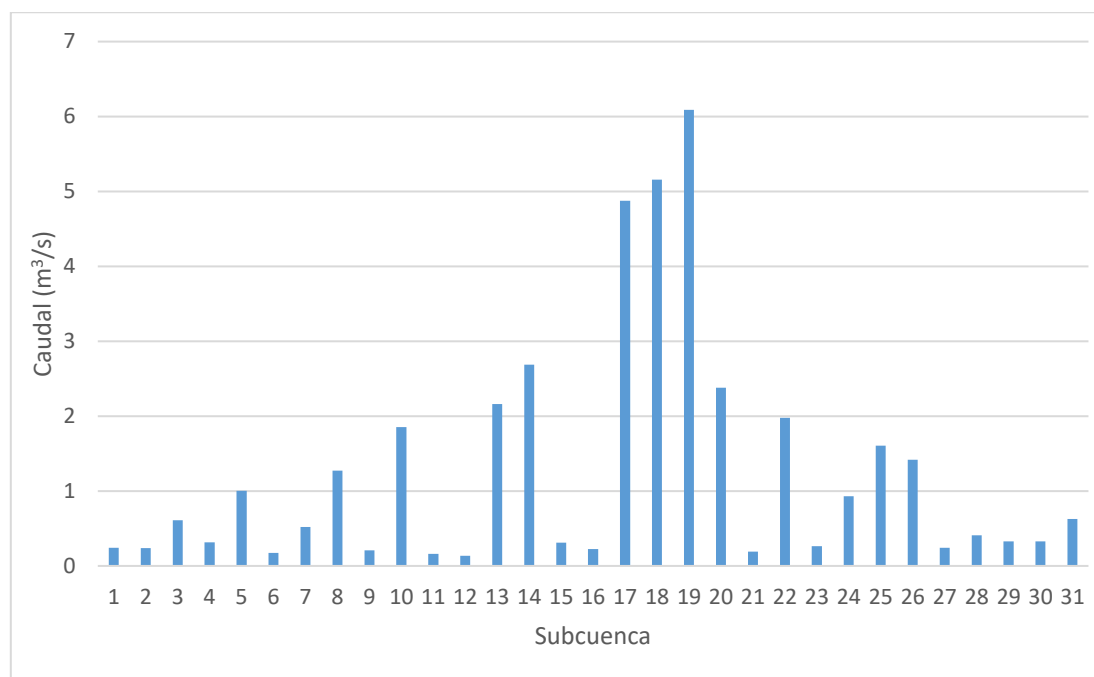


Tabla 45.
Escorrentía media anual por subcuena en escenario base.

SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)	SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)
1	488	17	112
2	485	18	81
3	447	19	78
4	443	20	169

5	442	21	335
6	478	22	400
7	494	23	404
8	443	24	103
9	273	25	396
10	444	26	421
11	339	27	400
12	333	28	397
13	141	29	270
14	174	30	488
15	163	31	515
16	272		

Figura 74.
Escorrentía media anual por subcuenca en escenario base.

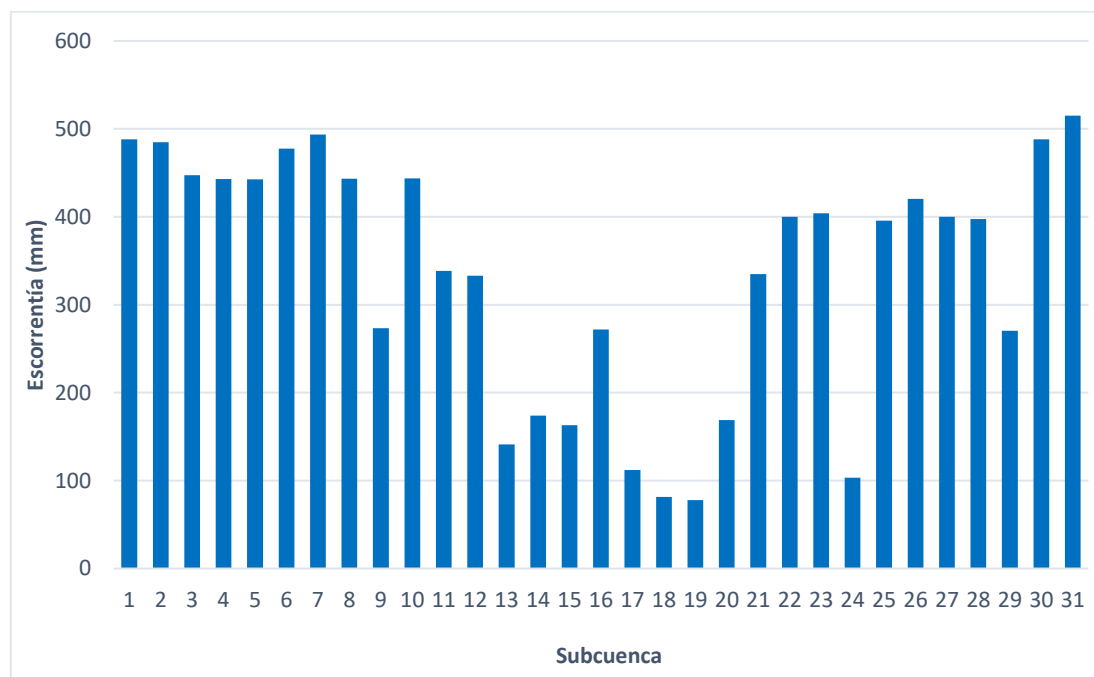


Figura 75.
Figura de Mapa de generación de sedimentos por subcuenca en escenario base que muestra la distribución de generación de sedimentos por subcuenca, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

Tabla 46.
Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario base.

SUBCUENCA	SEDIMENTOS (Tn/Ha)	SUBCUENCA	SEDIMENTOS (Tn/Ha)
1	754.04	17	47.47
2	583.57	18	28.64
3	1049.18	19	15.16
4	812.53	20	24.20
5	983.13	21	636.88
6	934.82	22	871.70
7	1039.37	23	980.85
8	1179.03	24	29.43
9	417.09	25	694.65
10	1281.80	26	602.45
11	675.61	27	817.39
12	737.35	28	791.10
13	9.98	29	588.30
14	8.30	30	662.26
15	16.32	31	1011.48
16	716.80		

Nota. La Subcuenca 10 es la de mayor generación de sedimentos.

Figura 76.
Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario base.

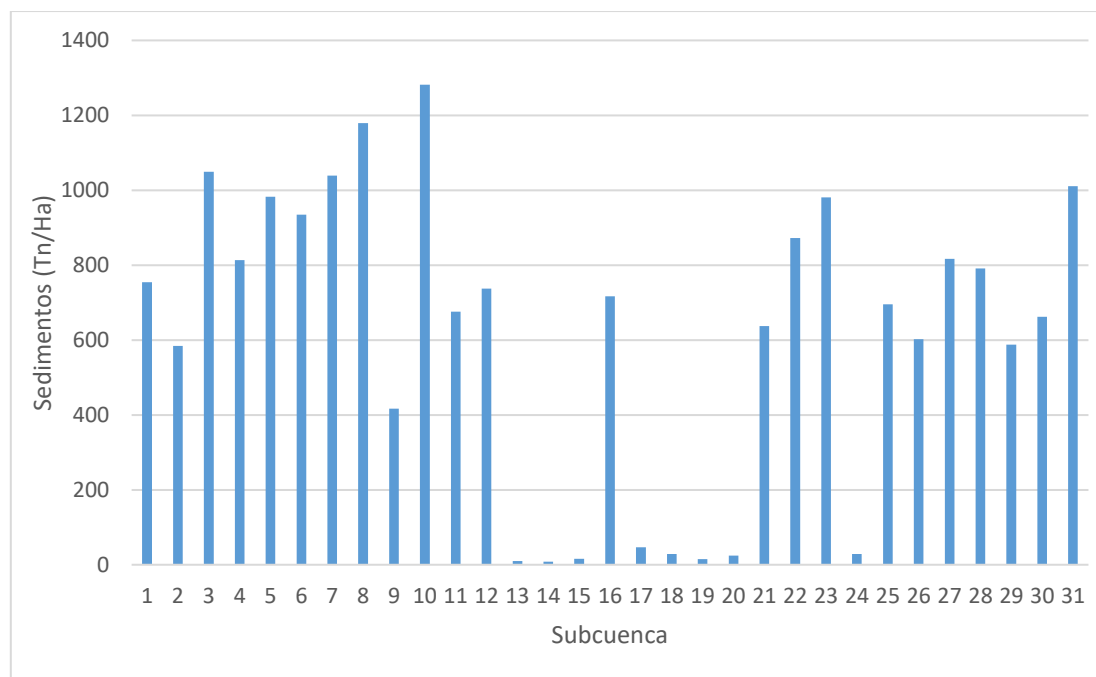


Figura 77.

Figura de Mapa de generación de sedimentos por URH en escenario base que muestra la distribución de generación de sedimentos por URH, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

Tabla 47.

Sedimentos medio anual por URH (primeros 50) en escenario base.

URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
1240	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	374.09	3020.77
237	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	325.00	2608.72
1249	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	110.55	2551.33
246	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	186.02	2465.15
187	6	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	154.91	2456.87
114	4	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	138.34	2389.95
42	2	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	64.98	2210.61
6	1	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	95.25	2159.79
834	23	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	299.25	2140.9
377	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	69.34	2132.48
125	4	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	41.92	2095.72

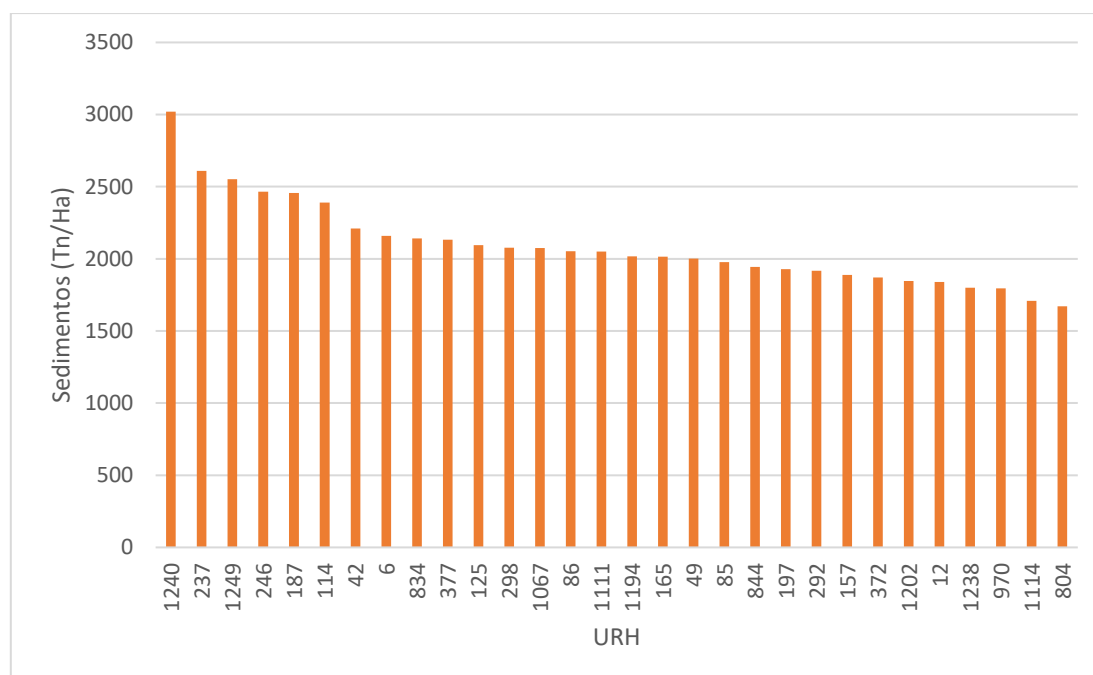
URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
298	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	77.00	2076.52
1067	27	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	228.50	2074.34
86	3	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	53.89	2052.31
1111	28	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	300.23	2051.29
1194	30	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	72.67	2018.16
165	5	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	36.95	2014.36
49	2	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	32.75	2002.23
85	3	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	41.31	1977.56
844	23	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	128.30	1943.46
197	6	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	22.83	1928.85
292	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	36.23	1918.22
157	5	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	35.88	1888.88
372	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	25.55	1870.86
1202	30	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	25.95	1846.84
12	1	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	34.13	1840.06
1238	31	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	500.06	1799.87
970	25	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	108.34	1796.13
1114	28	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	62.52	1709.36
804	22	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	69.31	1672.12
1077	27	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	30.77	1641.71
586	16	75-9999	I-Kl-c-5533	RNGB	274.75	1639.01
236	7	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	498.63	1635.06
1019	26	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	98.17	1634.47
301	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	11.64	1630.91
1253	31	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	218.25	1621.58
760	21	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	243.42	1613.2
385	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	7.58	1593.13
115	4	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	310.75	1587.6
186	6	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	225.03	1584.06
1031	26	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	66.80	1575.94
1262	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	3.25	1572.17

URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
976	25	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	28.17	1556.59
451	12	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	167.63	1554.44
257	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	4.78	1537.96
244	7	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	258.55	1518.61
406	11	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	165.33	1515.3
88	3	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	162.86	1512.36
82	3	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	161.08	1494.07
379	10	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	108.56	1473.37

Nota. URH de mayor generación de sedimentos.

Figura 78.

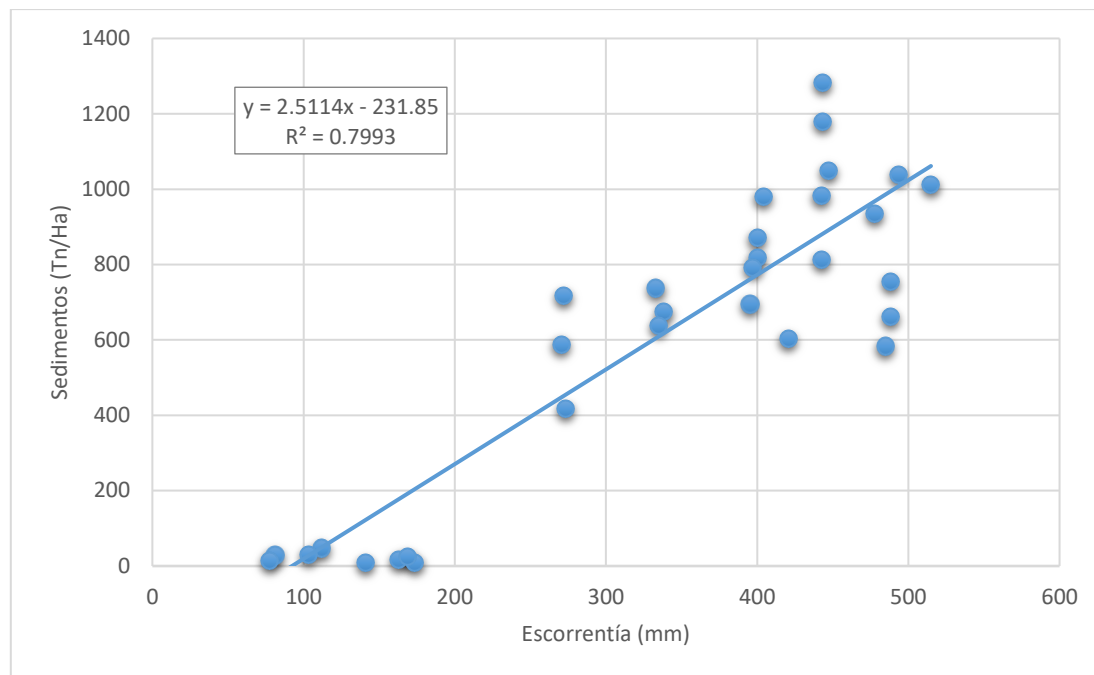
Sedimentos medio anual por URH (primeros 30) en escenario base.



Se evidencia que los URH con mayor pendiente y de suelos con nula o poca vegetación son los que producen mayores sedimentos.

Figura 79.

Correlación lineal entre escorrentía y sedimentos por subcuenca en escenario base.



4.3 Evaluación de caudales y sedimentos medios en futuro escenario climático y de cobertura vegetal

En esta sección se detallan los resultados obtenidos con un modelo en condiciones futuras en varios escenarios al año 2030, se identificarán y enumerarán las zonas de mayor generación de caudales y sedimentos en el área de estudio, así como otros datos importantes, también se comparará con el escenario base explicado en la sección anterior.

Se planteó un escenario de cambio de cobertura vegetal con una proyección pesimista de reducción de área boscosa y un aumento de área agrícola y estéril sin vegetación.

De igual manera, se planeó un escenario de cambio climático con la proyección concluida por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI. (2009) en el estudio “Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030”.

Finalmente, se unificó las dos posibilidades anteriores en único escenario.

4.3.1 Futuro escenario de cobertura vegetal únicamente

En este escenario se planteó el cambio de cobertura vegetal para el año 2030 con una proyección pesimista de reducción de área boscosa y un aumento de área agrícola y estéril sin vegetación.

Figura 80.

Figura de Mapa de cobertura vegetal en escenario año 2030 muestra la distribución de cobertura vegetal proyectada para el año 2030.

(siguiente página)

A continuación, se lista los resultados obtenidos.

Tabla 48.

Resultados medios mensuales de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio) en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.

MES	PRECIPITACIÓN (mm)	CAÍDA DE NIEVE (mm)	ESCORRENTÍA SUPERFICIAL (mm)	ESCORRENTÍA LATERAL (mm)	ESCORRENTÍA (mm)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN (mm)	SEDIMENTOS (Tn/Ha)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN POTENCIAL (mm)
1	129.71	5.18	51.47	11.12	62.91	52.53	139.08	65.18
2	146.51	4.84	62.17	14.3	77.01	50.94	190.7	57.81
3	150.66	4.45	66.16	14.12	81.01	55.94	186.16	61.87
4	49.73	1.49	15.6	5.6	22.15	37.87	35.06	48.77
5	10.54	0.62	1.94	0.92	3.48	31.24	4.99	74.41
6	2.88	0.57	0.23	0.15	0.94	18.18	0.79	85.84
7	1.43	0.41	0.02	0.05	0.64	11.87	0.07	97.63
8	4.99	0.99	0.19	0.27	0.99	11.34	0.64	100.34
9	16.78	1.62	1.56	1.32	3.35	15.15	4.6	80.2
10	34.44	1.17	5.35	2.76	8.51	23.17	12.17	71.17
11	45.55	1.24	10.25	3.92	14.49	28.31	21.37	68.03
12	96.16	2.35	32.47	8.06	40.73	37.58	72.67	58.37

Días de “estrés” en media anual de la cuenca alta del río Rímac:

- Días de estrés hídrico: 139.11
- Días de estrés de temperatura: 308.54
- Días de estrés de nitrógeno*: 0.01
- Días de estrés de fósforo*: 0.12
- Días de estrés de aireación*: 0.00

*Valores referenciales al no estar calibrados.

Otros valores en media anual de la cuenca alta del río Rímac:

- Precipitación: 685.7 mm
- Caída de nieve: 24.81 mm
- Derretimiento de nieve: 20.95 mm
- Sublimación: 3.86 mm
- Escorrentía superficial: 245.85 mm
- Escorrentía lateral: 62.23 mm
- Agua subterránea (acuífero poco profundo): 0.73 mm
- Agua subterránea (acuífero profundo): 5.11 mm

- Resurgimiento (agua que viaja desde el acuífero poco profundo al suelo o la vegetación): 10.83 mm
- Recarga del acuífero profundo: 5.11 mm
- Recarga total del acuífero: 16.90 mm
- Escorrentía (rendimiento hídrico total): 314.28 mm
- Percolación fuera del suelo: 16.88 mm
- Evapotranspiración: 372.8 mm
- Evapotranspiración potencial: 868.2 mm
- Carga total de sedimentos: 663.53 Tn/Ha

Figura 81.

Figura de Mapa de generación de caudales por subcuenca en escenario año 2030 (cambio de cobertura únicamente) que muestra la distribución de generación de caudales por subcuenca, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

Tabla 49.

Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.

SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)	SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)
1	0.24	17	4.96
2	0.24	18	5.24
3	0.61	19	6.18
4	0.31	20	2.46
5	1.00	21	0.19
6	0.18	22	2.06
7	0.52	23	0.26

8	1.27	24	0.93
9	0.21	25	1.69
10	1.86	26	1.42
11	0.16	27	0.24
12	0.13	28	0.41
13	2.17	29	0.33
14	2.77	30	0.33
15	0.31	31	0.63
16	0.23		

Nota. La subcuena 19 es la subcuena de captación de la cuenca alta del río Rímac. Se considera el punto de captación de cada subcuena, y no su generación independiente. Por lo tanto, las subcuenas inferiores tendrán mayor caudal que las superiores.

Figura 82.

Caudal medio anual de salida por subcuena en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.

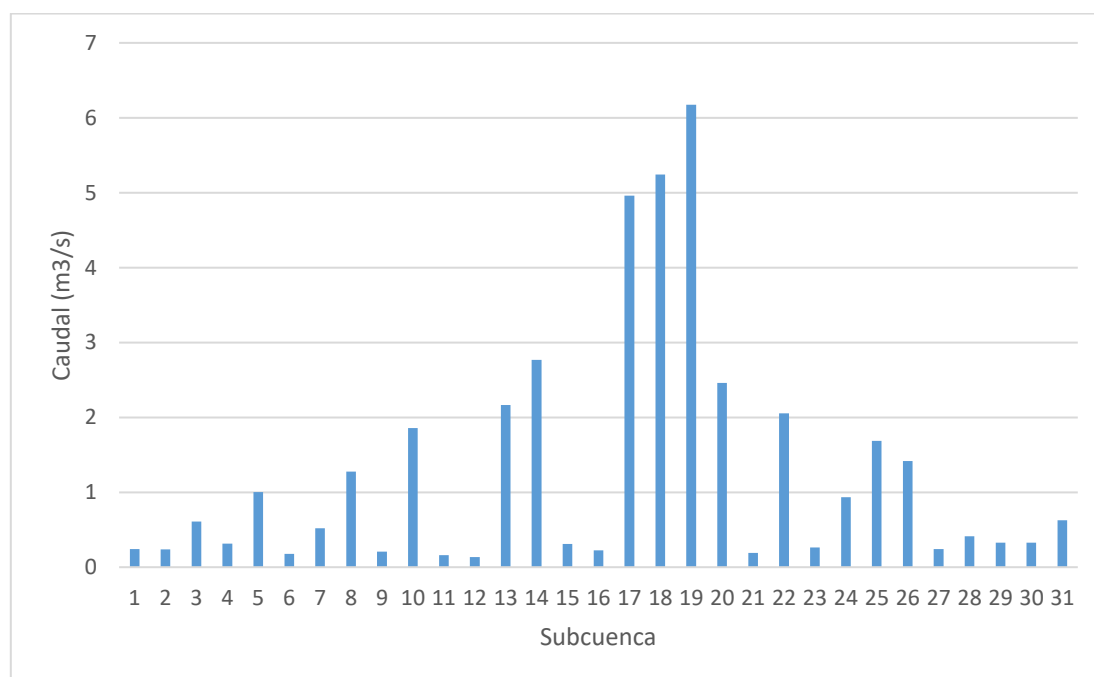


Tabla 50.

Escorrentía media anual por subcuena en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.

SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)	SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)
-----------	---------------------	-----------	---------------------

1	490	17	112
2	486	18	81
3	448	19	77
4	444	20	169
5	443	21	336
6	478	22	400
7	495	23	405
8	443	24	104
9	274	25	396
10	444	26	415
11	339	27	402
12	333	28	398
13	141	29	271
14	174	30	489
15	163	31	516
16	272		

Figura 83.

Escorrentía media anual por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.

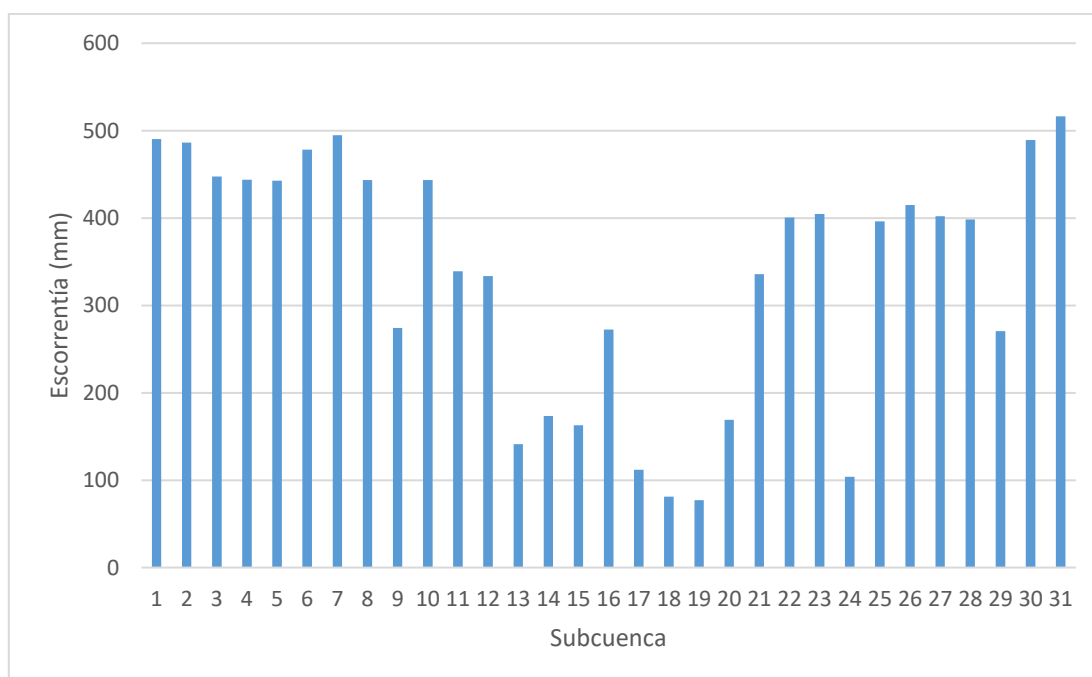


Figura 84.

Figura de Mapa de generación de sedimentos por subcuenca en escenario año 2030 (cambio de cobertura vegetal únicamente) que muestra la distribución de generación de sedimentos por subcuenca, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

Tabla 51.

Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.

SUBCUENCA	SEDIMENTOS (Tn/Ha)	SUBCUENCA	SEDIMENTOS (Tn/Ha)
1	853.37	17	45.11
2	710.37	18	28.44
3	1143.78	19	16.04
4	914.25	20	24.63
5	1103.82	21	737.42
6	1163.49	22	934.91
7	1237.55	23	1066.86
8	1204.34	24	29.70
9	568.31	25	760.08
10	1272.22	26	666.12
11	758.72	27	910.59
12	814.34	28	868.79
13	10.41	29	675.06
14	8.91	30	724.60
15	15.72	31	1168.68
16	769.01		

Nota. La Subcuenca 10 es la de mayor generación de sedimentos.

Figura 85.

Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.

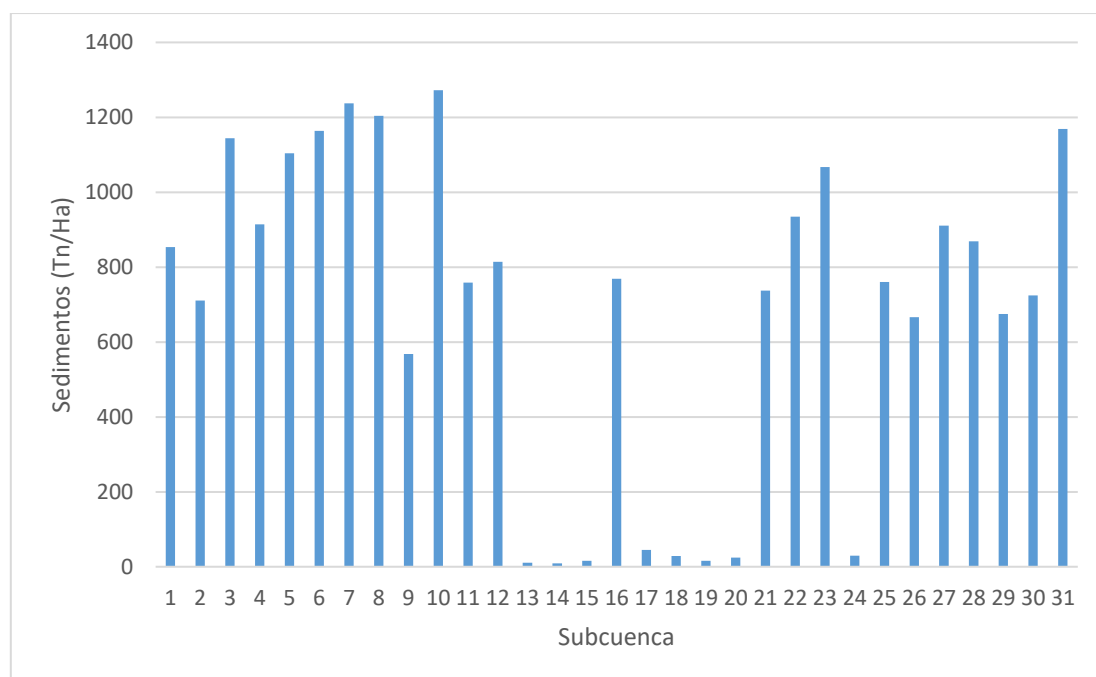


Figura 86.

Figura de Mapa de generación de sedimentos por URH en escenario año 2030 (cambio de cobertura vegetal únicamente) que muestra la distribución de generación de sedimentos por URH, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

Tabla 52.

Sedimentos medio anual por URH (primeros 50) en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.

URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
1163	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	520.22	3129.68
223	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	548.78	2768.06
182	6	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	205.08	2530.91
109	4	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	194.55	2508.43
42	2	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	112.23	2356.51
6	1	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	132.97	2232.02
787	23	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	415.45	2220.02
78	3	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	78.84	2128.57
1004	27	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	280.52	2122.2
1120	30	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	104.45	2121.84
1039	28	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	382.14	2107.61

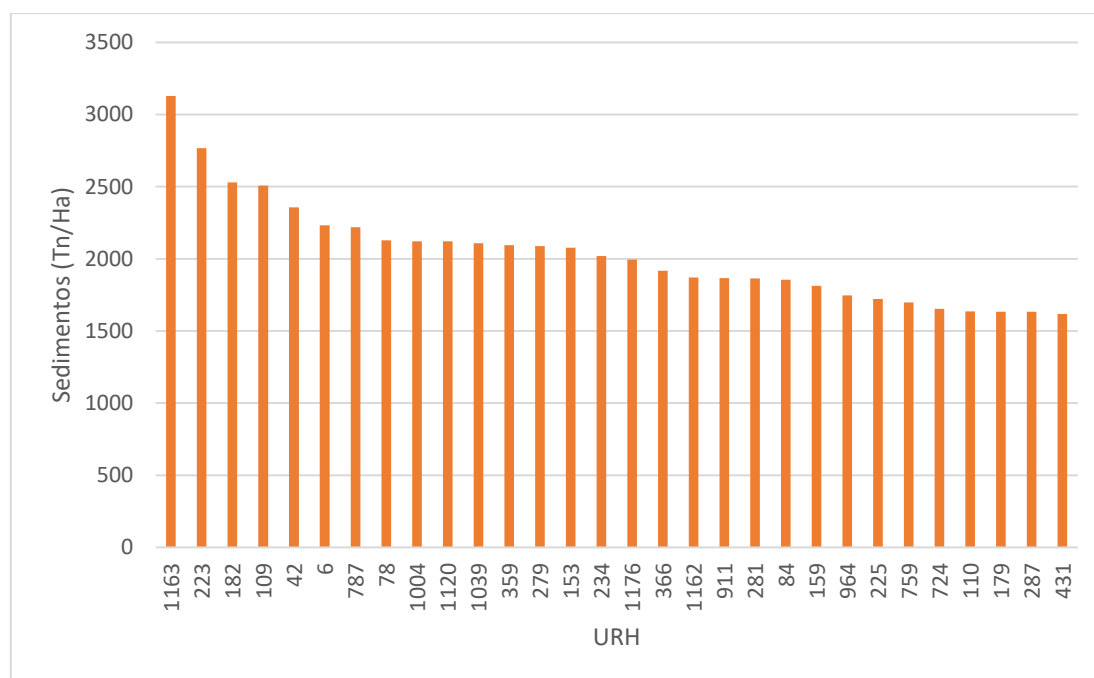
URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
359	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	59.63	2095.16
279	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	75.72	2087.97
153	5	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	66.73	2077.73
234	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	34.02	2019.78
1176	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	20.48	1995.74
366	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	29.59	1916.49
1162	31	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	722.83	1869.87
911	25	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	148.31	1866.64
281	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	36.97	1863.1
84	3	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	18.75	1856.3
159	5	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	13.69	1813.59
964	26	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	170.95	1747.13
225	7	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	806.97	1722.08
759	22	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	86.66	1698.38
724	21	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	316.00	1653.69
110	4	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	413.94	1635.42
179	6	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	303.83	1633.97
287	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	11.48	1633.7
431	12	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	253.28	1617.51
80	3	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	296.09	1609.91
368	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	7.91	1608.59
791	23	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	30.92	1605.38
376	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	AGRL	8.23	1604.96
390	11	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	263.63	1600.41
188	6	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	6.31	1597.1
1185	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	3.30	1588.72
117	4	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	4.17	1584.67
543	16	75-9999	I-Kl-c-5533	SWRN	192.23	1583.54
293	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	AGRL	3.59	1579.78
244	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	5.05	1570.74
15	1	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	9.50	1530.58

URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
10	1	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	298.42	1517.82
1071	29	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	633.47	1514.88
47	2	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	3.34	1509.08
151	5	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	167.78	1482.63
40	2	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	226.20	1474.43
558	16	75-9999	I-Kl-c-5533	RNGB	118.17	1467.38
278	8	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	196.28	1462.1
360	10	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	119.69	1452.88

Nota. URH de mayor generación de sedimentos.

Figura 87.

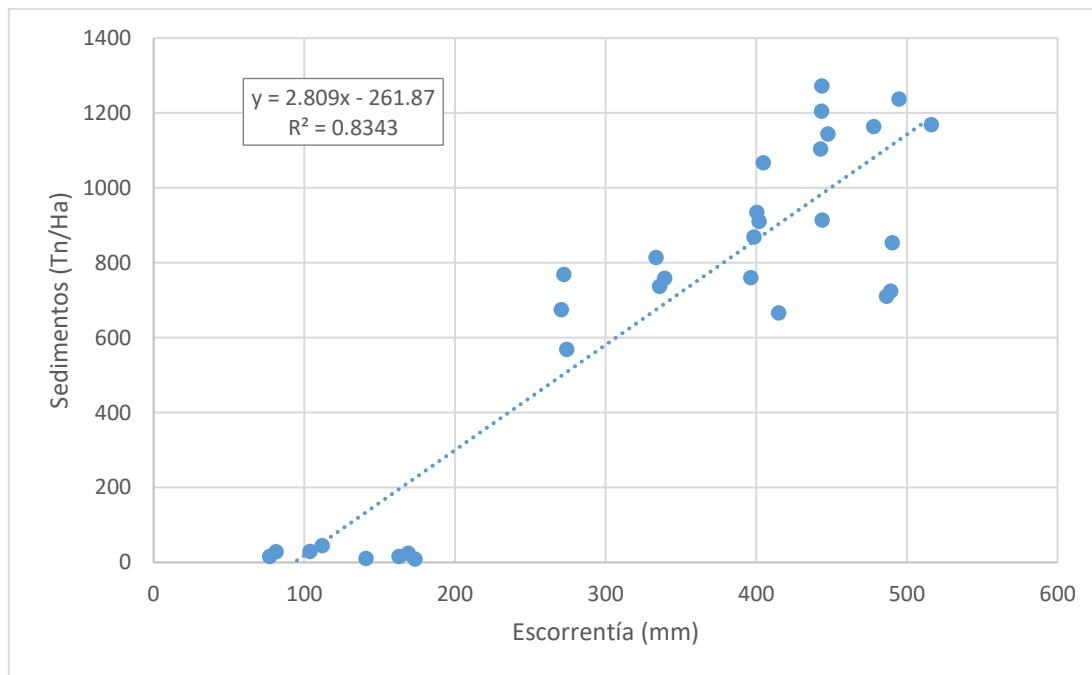
Sedimentos medio anual por URH (primeros 30) en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.



Se evidencia que los URH con mayor pendiente y de suelos con nula o poca vegetación son los que producen mayores sedimentos.

Figura 88.

Correlación lineal entre escorrentía y sedimentos por subcuenca en escenario con cambio de cobertura vegetal únicamente.



4.3.2 Futuro escenario climático únicamente

En este escenario, de igual manera, se planeó un escenario de cambio climático con la proyección concluida por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI. (2009) en el estudio “Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030”.

Específicamente se modeló con los siguientes cambios respecto al escenario base:

- Cambio temperatura máxima: +1.6 °C
- Cambio temperatura mínima: +0.9 °C (entre 0.4 – 1.4 %)
- Cambio precipitación: -15% (entre -10% y -20%)

Con esta proyección la precipitación media anual del área de estudio sería de 664 mm, de igual manera para la temperatura mínima y máxima que arrojaría 2.08 °C y 15.21 °C respectivamente.

Figura 89.

Figura de Mapa de isothermas máxima media anual en escenario año 2030 que muestra la distribución de temperatura máxima proyectada para el año 2030.

(siguiente página)

Figura 90.

Figura de Mapa de isothermas mínima media anual en escenario año 2030 que muestra la distribución de temperatura mínima proyectada para el año 2030.

(siguiente página)

Figura 91.

Figura de Mapa de isoyetas media anual en escenario año 2030 que muestra la distribución de precipitación media anual proyectada para el año 2030.

(siguiente página)

A continuación, se lista los resultados obtenidos.

Tabla 53.

Resultados medios mensuales de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio) en escenario con cambio climático únicamente.

MES	PRECIPITACIÓN (mm)	CAÍDA DE NIEVE (mm)	ESCORRENTÍA SUPERFICIAL (mm)	ESCORRENTÍA LATERAL (mm)	ESCORRENTÍA (mm)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN (mm)	SEDIMENTOS (Tn/Ha)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN POTENCIAL (mm)
1	116.17	0.22	39.44	8.64	48.17	61.55	94.52	78.07
2	126.71	0.19	44.21	10.53	54.93	56.5	120.38	65.12
3	135.28	0.25	49.72	10.77	60.8	65.1	129.82	73.16
4	46.53	0.07	10.96	4.34	15.79	41.79	23.27	55.64
5	9.54	0.04	1.12	0.71	2.1	32.33	2.51	82.69
6	1.14	0.01	0.01	0.03	0.27	20.21	0.02	99.11
7	1.36	0.05	0.01	0.04	0.28	14.93	0.01	108.44
8	5.32	0.04	0.17	0.31	0.69	16.44	0.58	113.84
9	14.68	0.01	0.95	0.99	2.12	18.81	2.67	94.99
10	33.38	0.01	3.97	2.51	6.61	26.55	8.7	80.73
11	39.82	0.03	6.56	3.1	9.76	31.94	11.84	78.54
12	95.39	0.08	27.26	7.32	34.55	43.13	54.07	64.97

Días de “estrés” en media anual de la cuenca alta del río Rímac:

- Días de estrés hídrico: 146.03
- Días de estrés de temperatura: 295.83
- Días de estrés de nitrógeno*: 0.75
- Días de estrés de fósforo*: 0.19
- Días de estrés de aireación*: 0.00

*Valores referenciales al no estar calibrados.

Otros valores en media anual de la cuenca alta del río Rímac:

- Precipitación: 626.2 mm
- Caída de nieve: 1.00 mm
- Derretimiento de nieve: 0.81 mm
- Sublimación: 0.19 mm
- Escorrentía superficial: 184.69 mm
- Escorrentía lateral: 49.37 mm
- Agua subterránea (acuífero poco profundo): 0.47 mm
- Agua subterránea (acuífero profundo): 2.03 mm
- Resurgimiento (agua que viaja desde el acuífero poco profundo al suelo o la vegetación): 3.60 mm

- Recarga del acuífero profundo: 1.92 mm
- Recarga total del acuífero: 6.36 mm
- Escorrentía (rendimiento hídrico total): 236.46 mm
- Percolación fuera del suelo: 5.68 mm
- Evapotranspiración: 429.7 mm
- Evapotranspiración potencial: 995.8 mm
- Carga total de sedimentos: 449.24 Tn/Ha

Figura 92.

Figura de Mapa de generación de caudales por subcuenca en escenario año 2030 (cambio climático únicamente) que muestra la distribución de generación de caudales por subcuenca, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

Tabla 54.

Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.

SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)	SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)
1	0.21	17	4.01
2	0.21	18	4.23
3	0.53	19	4.96
4	0.26	20	1.95
5	0.86	21	0.13
6	0.14	22	1.66
7	0.45	23	0.21
8	1.08	24	0.73
9	0.17	25	1.36
10	1.59	26	1.13

11	0.11	27	0.20
12	0.10	28	0.34
13	1.83	29	0.26
14	2.17	30	0.27
15	0.22	31	0.49
16	0.18		

Nota. La subcuenca 19 es la subcuenca de captación de la cuenca alta del río Rímac. Se considera el punto de captación de cada subcuenca, y no su generación independiente. Por lo tanto, las subcuencas inferiores tendrán mayor caudal que las superiores.

Figura 93.

Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.

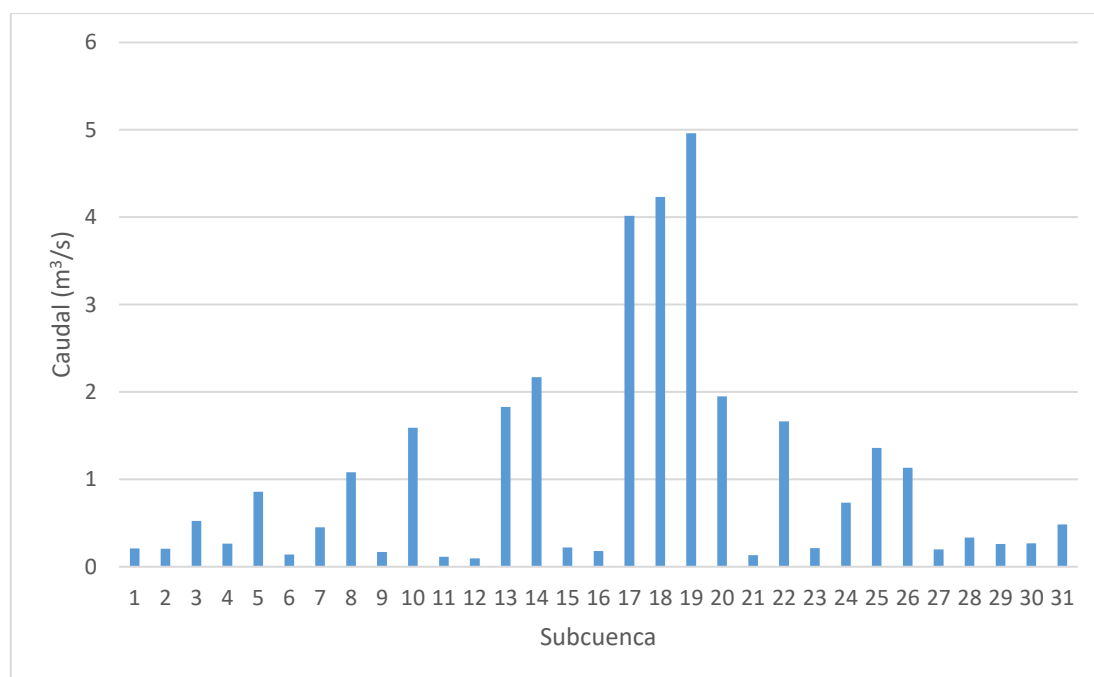


Tabla 55.

Escorrentía media anual por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.

SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)	SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)
1	422	17	78
2	422	18	50
3	381	19	48

SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)	SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)
4	373	20	121
5	383	21	235
6	383	22	329
7	430	23	330
8	385	24	72
9	223	25	324
10	386	26	337
11	237	27	328
12	240	28	325
13	100	29	215
14	136	30	405
15	125	31	400
16	218		

Figura 94.

Escorrentía media anual por subcuena en escenario con cambio climático únicamente.

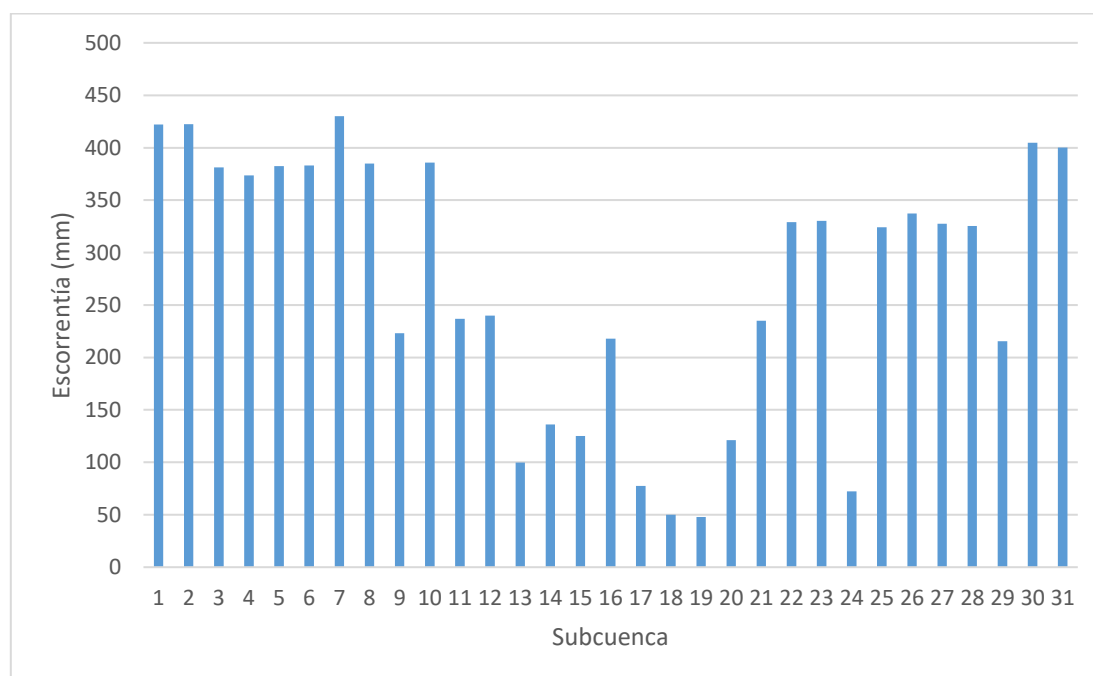
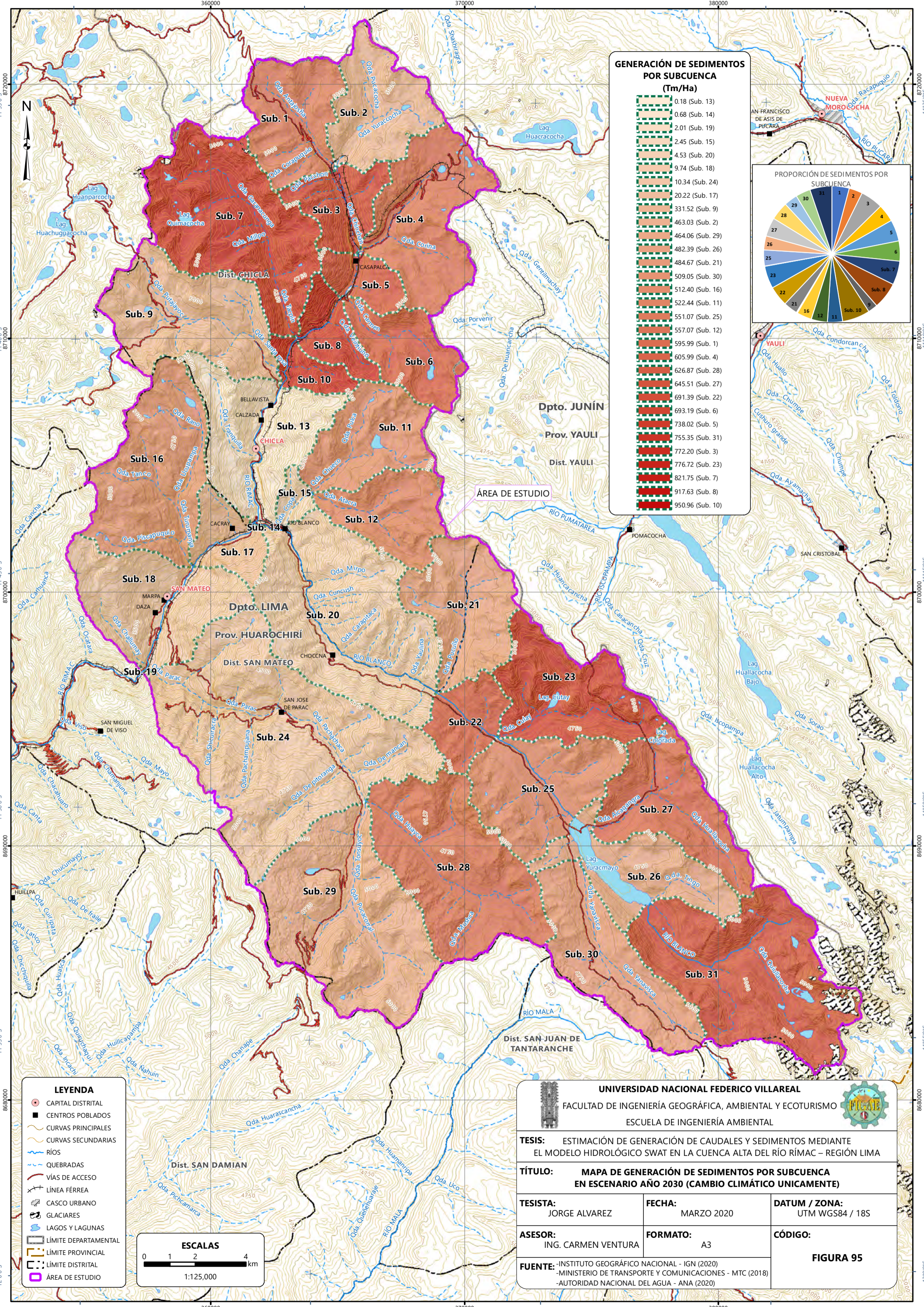


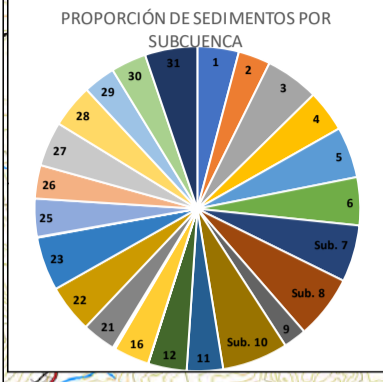
Figura 95.

Figura de Mapa de generación de sedimentos por subcuena en escenario año 2030 (cambio climático)



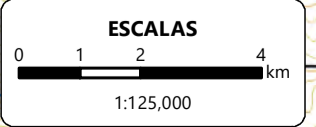
GENERACIÓN DE SEDIMENTOS POR SUBCUENCA (Tm/Ha)

0.18	(Sub. 13)
0.68	(Sub. 14)
2.01	(Sub. 19)
2.45	(Sub. 15)
4.53	(Sub. 20)
9.74	(Sub. 18)
10.34	(Sub. 24)
20.22	(Sub. 17)
331.52	(Sub. 9)
463.03	(Sub. 2)
464.06	(Sub. 29)
482.39	(Sub. 26)
484.67	(Sub. 21)
509.05	(Sub. 30)
512.40	(Sub. 16)
522.44	(Sub. 11)
551.07	(Sub. 25)
557.07	(Sub. 12)
595.99	(Sub. 1)
605.99	(Sub. 4)
626.87	(Sub. 28)
645.51	(Sub. 27)
691.39	(Sub. 22)
693.19	(Sub. 6)
738.02	(Sub. 5)
755.35	(Sub. 31)
772.20	(Sub. 3)
776.72	(Sub. 23)
821.75	(Sub. 7)
917.63	(Sub. 8)
950.96	(Sub. 10)



LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CENTROS POBLADOS
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL		
TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA		
TÍTULO: MAPA DE GENERACIÓN DE SEDIMENTOS POR SUBCUENCA EN ESCENARIO AÑO 2030 (CAMBIO CLIMÁTICO ÚNICAMENTE)		
TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: <div style="text-align: center;">FIGURA 95</div>
FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020) -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018) -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)		

únicamente) que muestra la distribución de generación de sedimentos por subcuenca, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

Tabla 56.

Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.

SUBCUENCA	SEDIMENTOS (Tn/Ha)	SUBCUENCA	SEDIMENTOS (Tn/Ha)
1	595.99	17	20.22
2	463.03	18	9.74
3	772.20	19	2.01
4	605.99	20	4.53
5	738.02	21	484.67
6	693.19	22	691.39
7	821.75	23	776.72
8	917.63	24	10.34
9	331.52	25	551.07
10	950.96	26	482.39
11	522.44	27	645.51
12	557.07	28	626.87
13	0.18	29	464.06
14	0.68	30	509.05
15	2.45	31	755.35
16	512.40		

Nota. La Subcuenca 10 es la de mayor generación de sedimentos.

Figura 96.

Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.

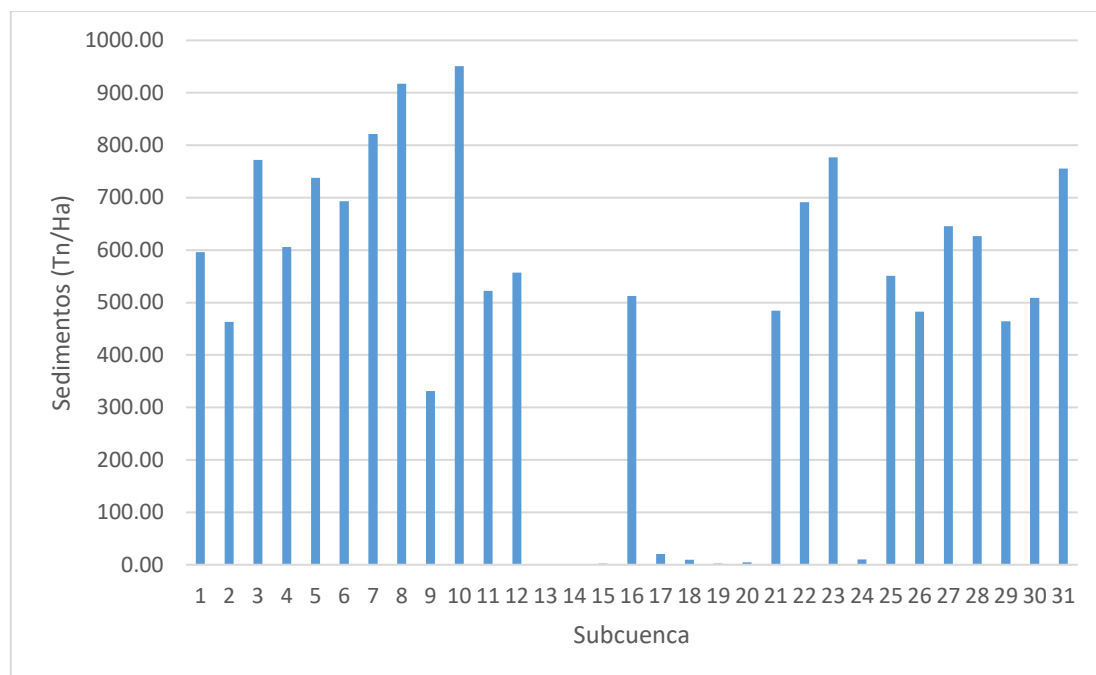


Figura 97.

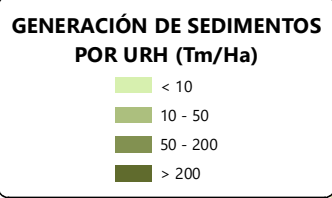
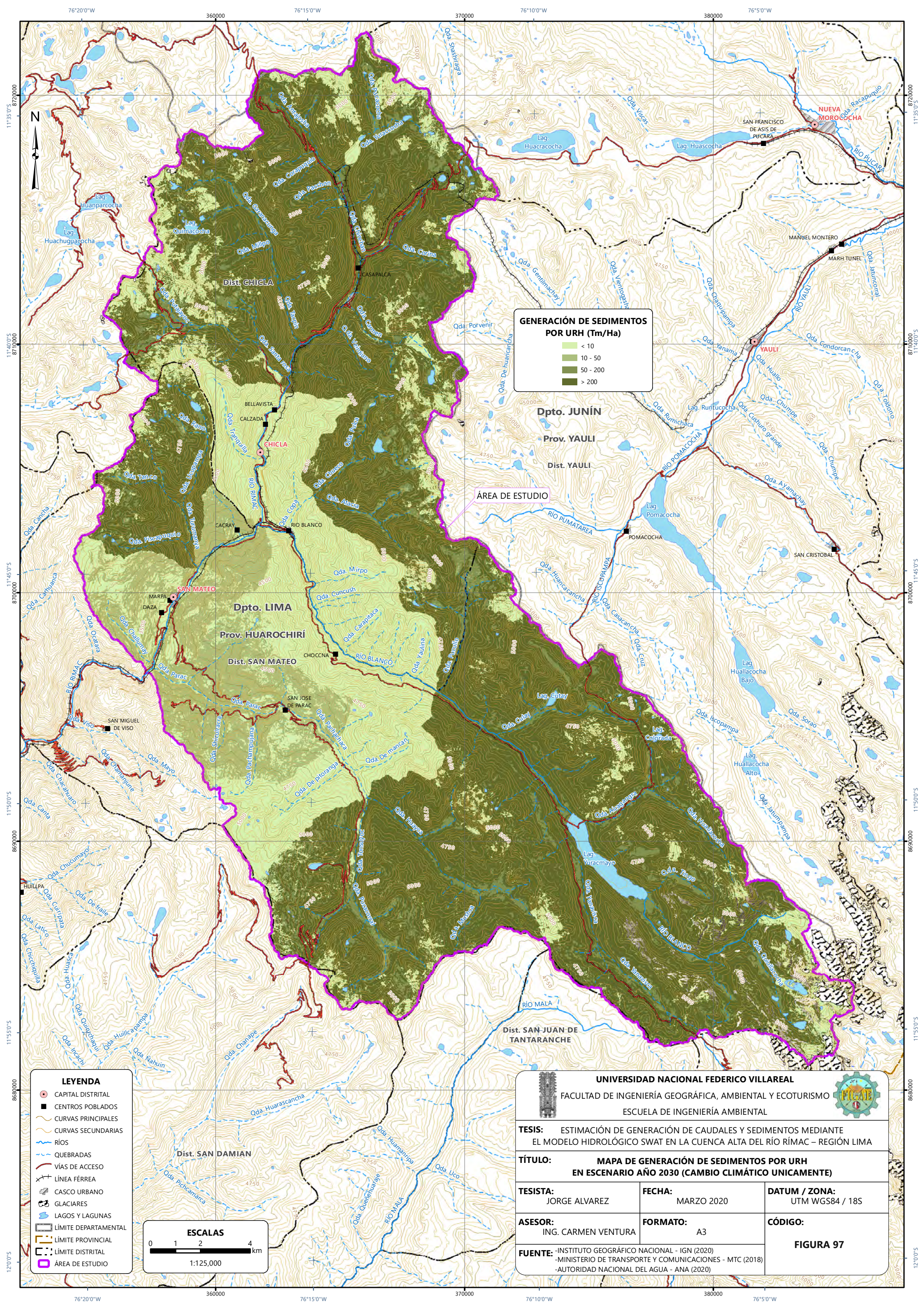
Figura de Mapa de generación de sedimentos por URH en escenario año 2030 (cambio climático únicamente) que muestra la distribución de generación de sedimentos por URH, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

Tabla 57.

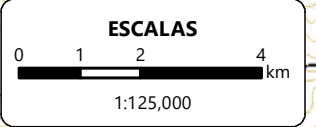
Sedimentos medio anual por URH (primeros 50) en escenario con cambio climático únicamente.

URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
1240	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	374.09	2229.16
237	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	325.00	2056.04
246	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	186.02	1942.68
1249	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	110.55	1883.88
187	6	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	154.91	1805.76
114	4	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	138.34	1770.13
42	2	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	64.98	1743.5
6	1	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	95.25	1697.87
834	23	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	299.25	1696.45
1067	27	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	228.50	1638.62
1111	28	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	300.23	1626.74



ÁREA DE ESTUDIO

- LEYENDA**
- CAPITAL DISTRITAL
 - CENTROS POBLADOS
 - CURVAS PRINCIPALES
 - CURVAS SECUNDARIAS
 - RÍOS
 - QUEBRADAS
 - VÍAS DE ACCESO
 - LÍNEA FÉRREA
 - CASCO URBANO
 - GLACIARES
 - LAGOS Y LAGUNAS
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



<p>UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO</p> <p>ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL</p>		
<p>TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA</p>		
<p>TÍTULO: MAPA DE GENERACIÓN DE SEDIMENTOS POR URH EN ESCENARIO AÑO 2030 (CAMBIO CLIMÁTICO UNICAMENTE)</p>		
<p>TESISTA: JORGE ALVAREZ</p>	<p>FECHA: MARZO 2020</p>	<p>DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S</p>
<p>ASESOR: ING. CARMEN VENTURA</p>	<p>FORMATO: A3</p>	<p>CÓDIGO: FIGURA 97</p>
<p>FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020) -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018) -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)</p>		

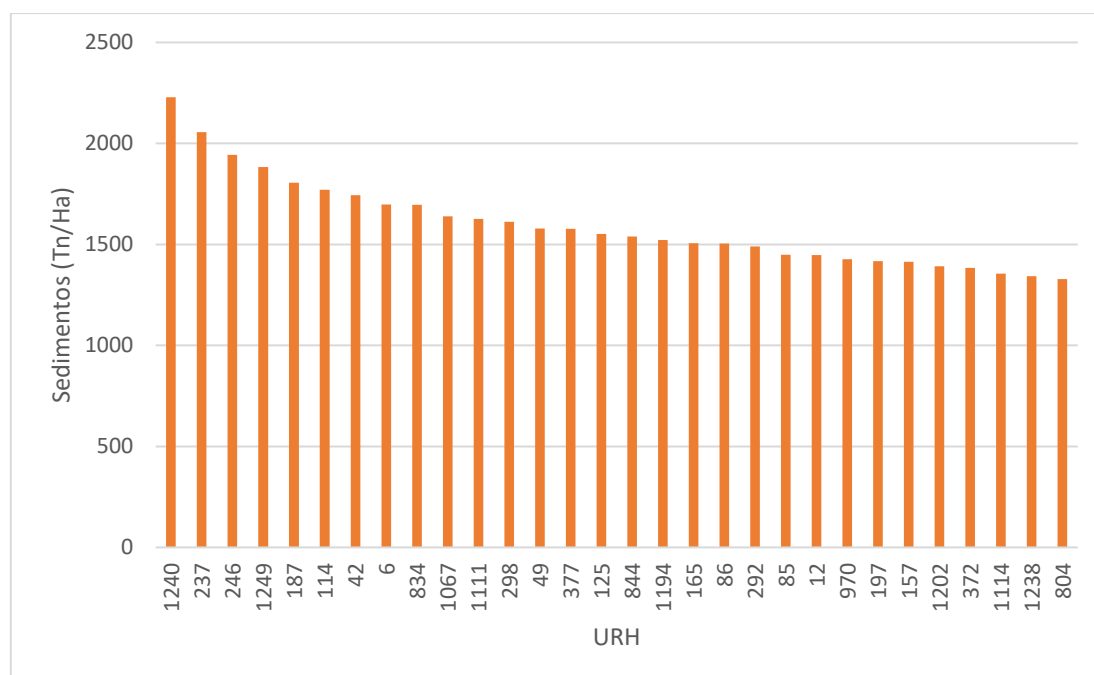
URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
298	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	77.00	1612.52
49	2	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	32.75	1579.2
377	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	69.34	1577.79
125	4	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	41.92	1552.09
844	23	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	128.30	1539.51
1194	30	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	72.67	1521.71
165	5	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	36.95	1506.52
86	3	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	53.89	1503.67
292	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	36.23	1489.63
85	3	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	41.31	1448.93
12	1	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	34.13	1446.63
970	25	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	108.34	1425.92
197	6	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	22.83	1417.89
157	5	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	35.88	1413.36
1202	30	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	25.95	1391.74
372	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	25.55	1384.37
1114	28	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	62.52	1355.06
1238	31	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	500.06	1342.26
804	22	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	69.31	1327.66
1019	26	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	98.17	1309.42
1077	27	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	30.77	1296.23
236	7	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	498.63	1291.01
301	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	11.64	1266.84
1031	26	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	66.80	1262.43
976	25	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	28.17	1235.54
257	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	4.78	1211.99
1253	31	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	218.25	1209.52
760	21	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	243.42	1208.4
244	7	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	258.55	1198.88
115	4	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	310.75	1180.74
385	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	7.58	1178.96

URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
186	6	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	225.03	1175.35
586	16	75-9999	I-Kl-c-5533	RNGB	274.75	1175.18
1262	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	3.25	1162.36
451	12	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	167.63	1161.65
406	11	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	165.33	1155.91
9	1	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	210.14	1148.49
1141	29	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	491.56	1146.08
296	8	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	162.02	1125.35

Nota. URH de mayor generación de sedimentos.

Figura 98.

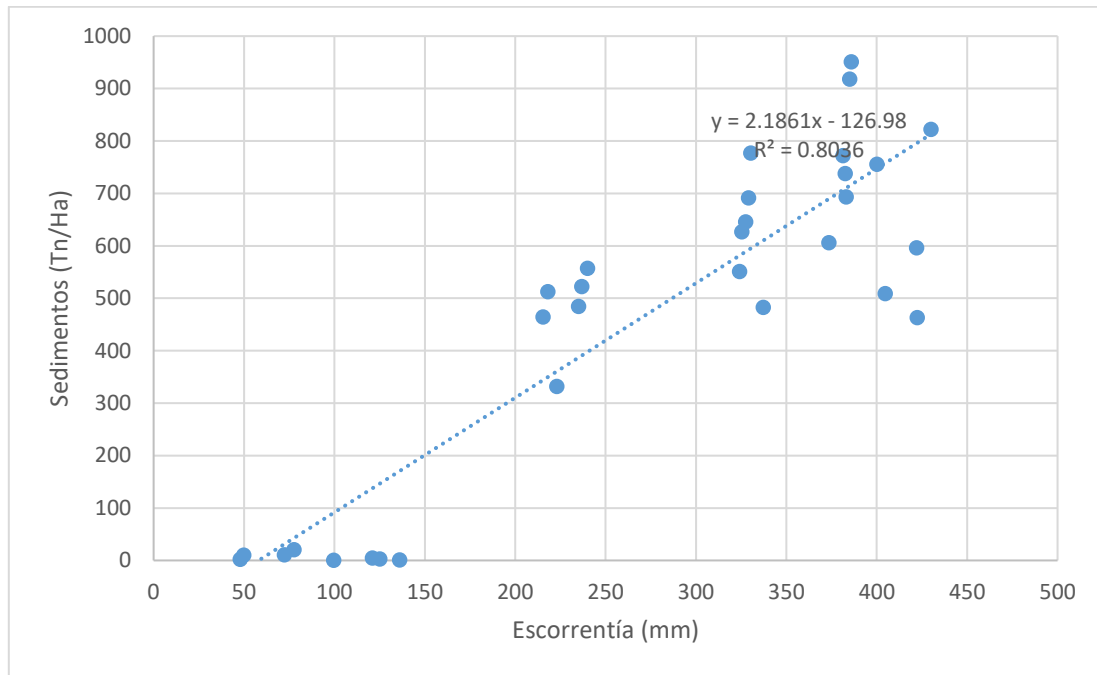
Sedimentos medio anual por URH (primeros 30) en escenario con cambio climático únicamente.



Se evidencia que los URH con mayor pendiente y de suelos con nula o poca vegetación son los que producen mayores sedimentos.

Figura 99.

Correlación lineal entre escorrentía y sedimentos por subcuenca en escenario con cambio climático únicamente.



4.3.3 Futuro escenario climático y de cobertura vegetal

Finalmente, se unificó las dos posibilidades anteriores en un único escenario.

A continuación, se lista los resultados obtenidos.

Tabla 58.

Resultados medios mensuales de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio) en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.

MES	PRECIPITACIÓN (mm)	CAÍDA DE NIEVE (mm)	ESCORRENTÍA SUPERFICIAL (mm)	ESCORRENTÍA LATERAL (mm)	ESCORRENTÍA (mm)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN (mm)	SEDIMENTOS (Tn/Ha)	EVAPOTRANS- PIRACIÓN POTENCIAL (mm)
1	116.17	0.24	42.1	9.14	51.34	59.64	106.99	74.98
2	126.71	0.2	47.38	11.08	58.67	55.12	136.18	62.49
3	135.28	0.28	53.16	11.34	64.85	63.63	146.7	70.19
4	46.53	0.08	11.82	4.59	16.94	40.04	26.55	53.17
5	9.54	0.04	1.2	0.76	2.25	28.41	2.83	79.44
6	1.14	0.01	0.01	0.03	0.28	15.12	0.02	95.97
7	1.36	0.05	0.01	0.05	0.29	9.06	0.01	105.1
8	5.32	0.05	0.18	0.33	0.74	10.45	0.66	110.45
9	14.68	0.01	1.03	1.07	2.29	13.96	3.06	91.81
10	33.38	0.01	4.29	2.7	7.12	22.85	9.99	77.76
11	39.82	0.03	7.06	3.31	10.46	28.54	13.48	75.53
12	95.39	0.09	29.3	7.8	37.06	41.06	61.5	62.31

Días de “estrés” en media anual de la cuenca alta del río Rímac:

- Días de estrés hídrico: 155.15
- Días de estrés de temperatura: 312.93
- Días de estrés de nitrógeno*: 0.52
- Días de estrés de fósforo*: 0.21
- Días de estrés de aireación*: 0.00

*Valores referenciales al no estar calibrados.

Otros valores en media anual de la cuenca alta del río Rímac:

- Precipitación: 626.2 mm
- Caída de nieve: 1.09 mm
- Derretimiento de nieve: 0.89 mm
- Sublimación: 0.21 mm
- Escorrentía superficial: 197.88 mm
- Escorrentía lateral: 52.27 mm
- Agua subterránea (acuífero poco profundo): 0.52 mm
- Agua subterránea (acuífero profundo): 2.11 mm
- Resurgimiento (agua que viaja desde el acuífero poco profundo al suelo o la vegetación): 3.70 mm

- Recarga del acuífero profundo: 1.99 mm
- Recarga total del acuífero: 6.60 mm
- Escorrentía (rendimiento hídrico total): 252.71 mm
- Percolación fuera del suelo: 5.91 mm
- Evapotranspiración: 388.3 mm
- Evapotranspiración potencial: 959.6 mm
- Carga total de sedimentos: 508.95 Tn/Ha

Figura 100.

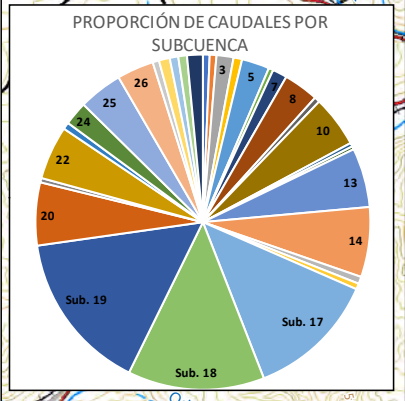
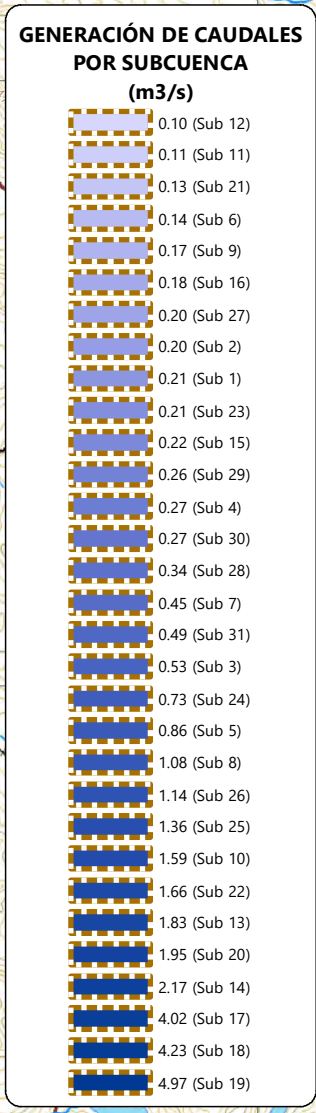
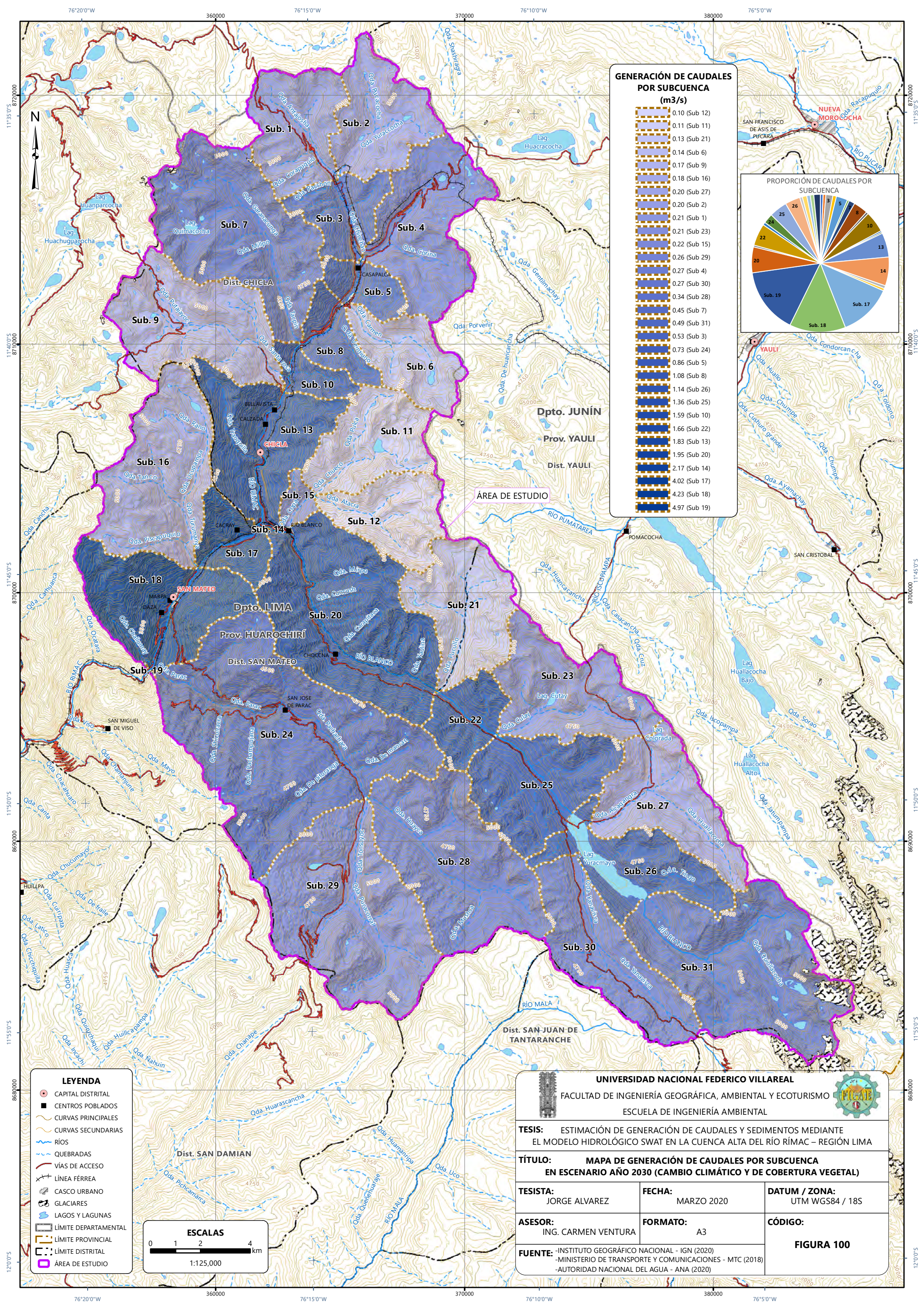
Figura de Mapa de generación de caudales por subcuenca en escenario año 2030 (cambio climático y de cobertura vegetal) que muestra la distribución de generación de caudales por subcuenca, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

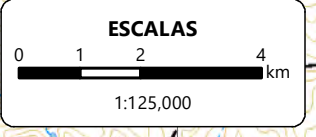
Tabla 59.

Caudal medio anual de salida por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.

SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)	SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)
1	0.21	17	4.02
2	0.21	18	4.23
3	0.53	19	4.97
4	0.27	20	1.95
5	0.86	21	0.13
6	0.14	22	1.66
7	0.45	23	0.21
8	1.08	24	0.73
9	0.17	25	1.36
10	1.59	26	1.14



- #### LEYENDA
- CAPITAL DISTRITAL
 - CENTROS POBLADOS
 - CURVAS PRINCIPALES
 - CURVAS SECUNDARIAS
 - RÍOS
 - QUEBRADAS
 - VÍAS DE ACCESO
 - LÍNEA FÉRREA
 - CASCO URBANO
 - GLACIARES
 - LAGOS Y LAGUNAS
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE GENERACIÓN DE CAUDALES POR SUBCUENCA EN ESCENARIO AÑO 2030 (CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COBERTURA VEGETAL)

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 100

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)

SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)	SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)
11	0.11	27	0.20
12	0.10	28	0.34
13	1.83	29	0.26
14	2.17	30	0.27
15	0.22	31	0.49
16	0.18		

Nota. La subcuena 19 es la subcuena de captación de la cuenca alta del río Rímac. Se considera el punto de captación de cada subcuena, y no su generación independiente. Por lo tanto, las subcuenas inferiores tendrán mayor caudal que las superiores.

Figura 101.

Caudal medio anual de salida por subcuena en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.

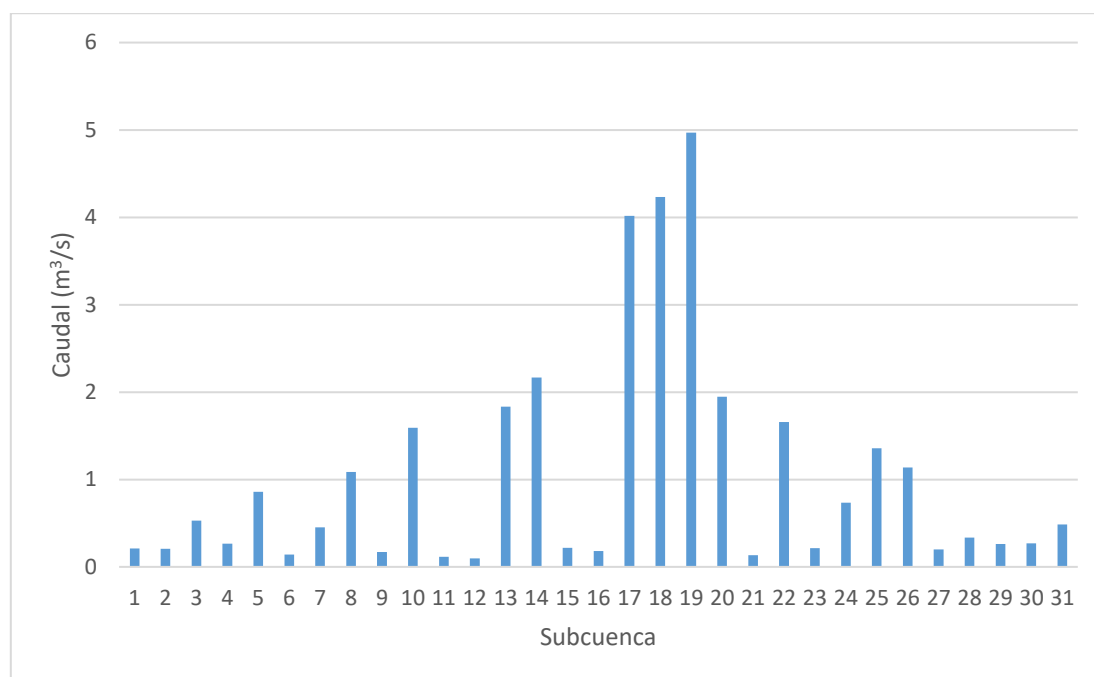


Tabla 60.

Escorrentía media anual por subcuena en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.

SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)	SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)
1	425	17	78
2	424	18	50

SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)	SUBCUENCA	ESCORRENTÍA (mm)
3	382	19	48
4	375	20	121
5	383	21	236
6	383	22	329
7	431	23	331
8	385	24	73
9	224	25	325
10	386	26	339
11	238	27	329
12	240	28	326
13	100	29	216
14	136	30	406
15	125	31	401
16	218		

Figura 102.

Escorrentía media anual por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.

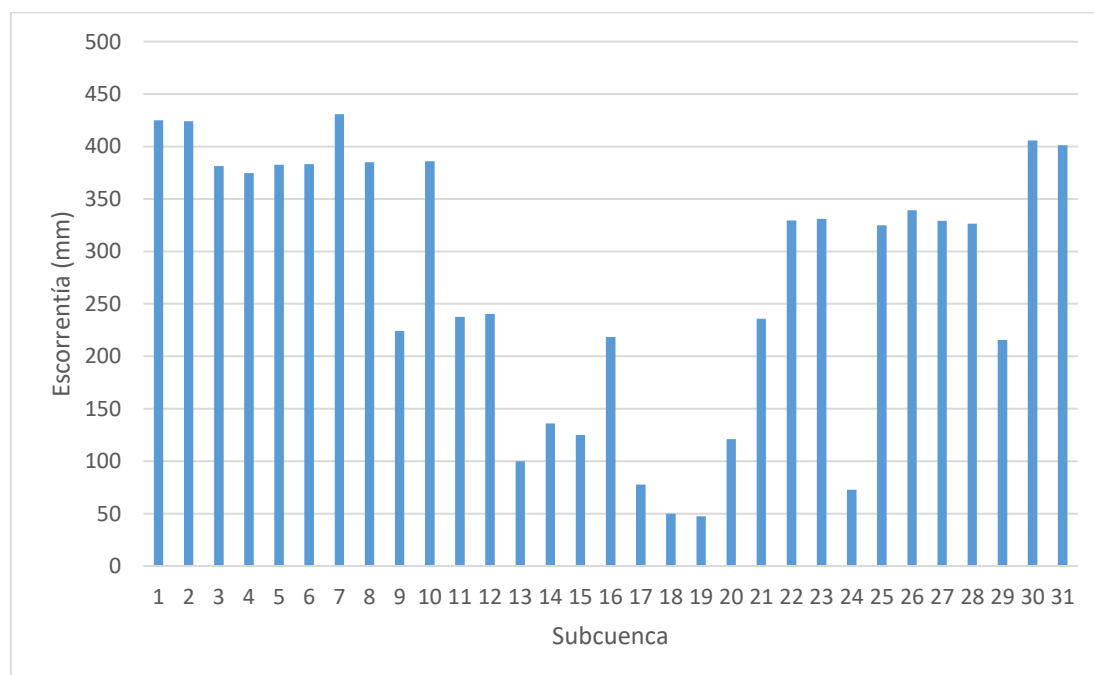


Figura 103.

Figura de Mapa de generación de sedimentos por subcuenca en escenario año 2030 (cambio climático y de cobertura vegetal) que muestra la distribución de generación de sedimentos por subcuenca, notándose claramente las que más generan.

(siguiente página)

Tabla 61.

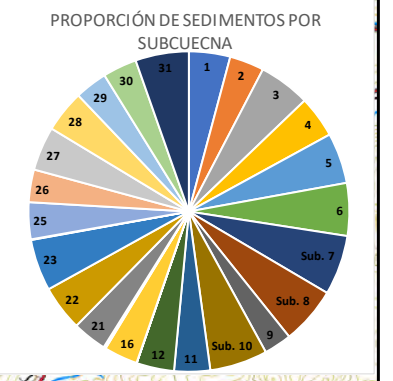
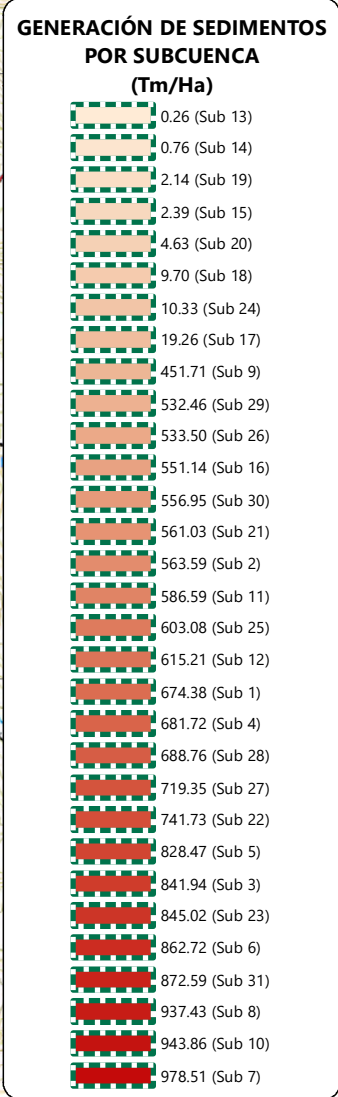
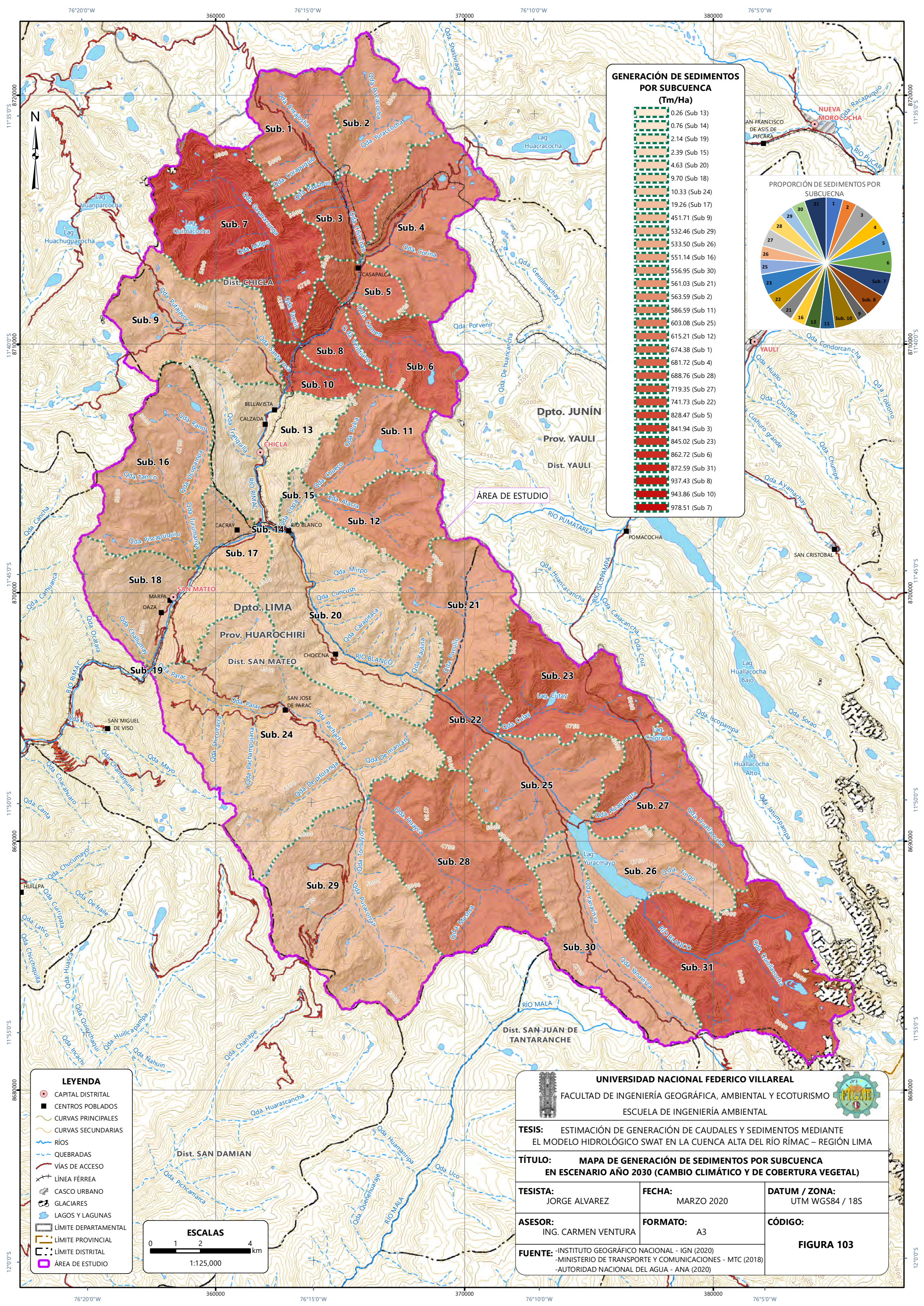
Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.

SUBCUENCA	SEDIMENTOS (Tn/Ha)	SUBCUENCA	SEDIMENTOS (Tn/Ha)
1	674.38	17	19.26
2	563.59	18	9.70
3	841.94	19	2.14
4	681.72	20	4.63
5	828.47	21	561.03
6	862.72	22	741.73
7	978.51	23	845.02
8	937.43	24	10.33
9	451.71	25	603.08
10	943.86	26	533.50
11	586.59	27	719.35
12	615.21	28	688.76
13	0.26	29	532.46
14	0.76	30	556.95
15	2.39	31	872.59
16	551.14		

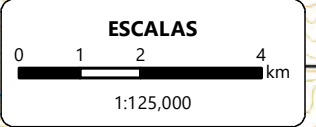
Nota. La Subcuenca 7 es la de mayor generación de sedimento.

Figura 104.

Sedimentos medio anual por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.



- #### LEYENDA
- CAPITAL DISTRITAL
 - CENTROS POBLADOS
 - CURVAS PRINCIPALES
 - CURVAS SECUNDARIAS
 - RÍOS
 - QUEBRADAS
 - VÍAS DE ACCESO
 - LÍNEA FÉRREA
 - CASCO URBANO
 - GLACIARES
 - LAGOS Y LAGUNAS
 - LÍMITE DEPARTAMENTAL
 - LÍMITE PROVINCIAL
 - LÍMITE DISTRITAL
 - ÁREA DE ESTUDIO



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE GENERACIÓN DE SEDIMENTOS POR SUBCUECA EN ESCENARIO AÑO 2030 (CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COBERTURA VEGETAL)

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 103

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)

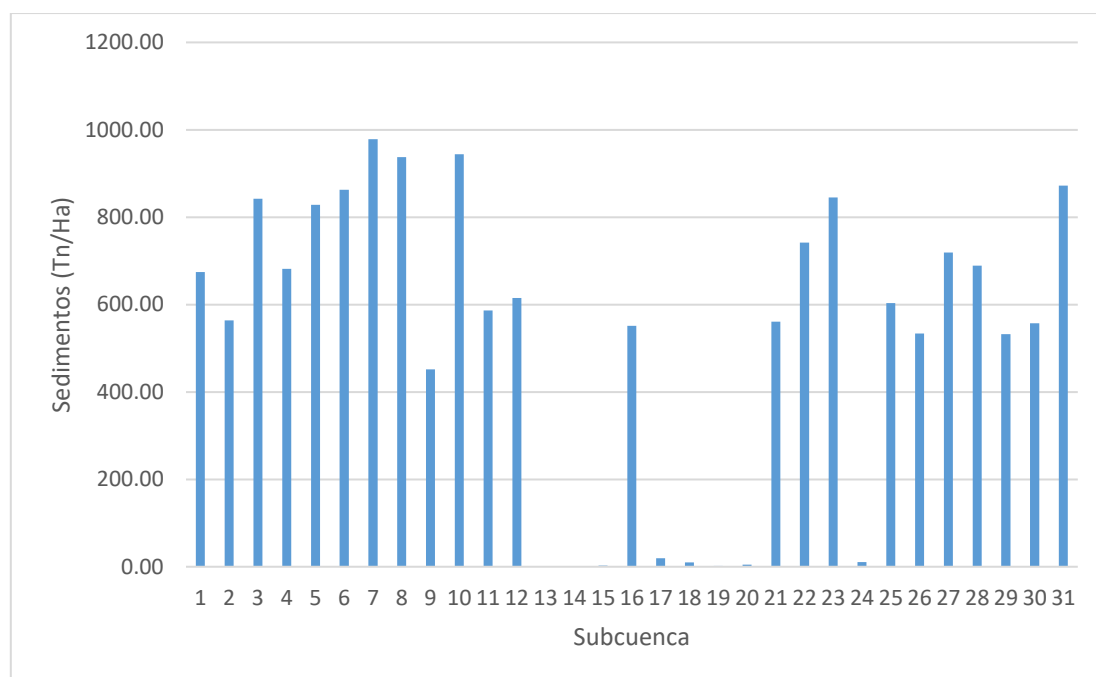


Figura 105.

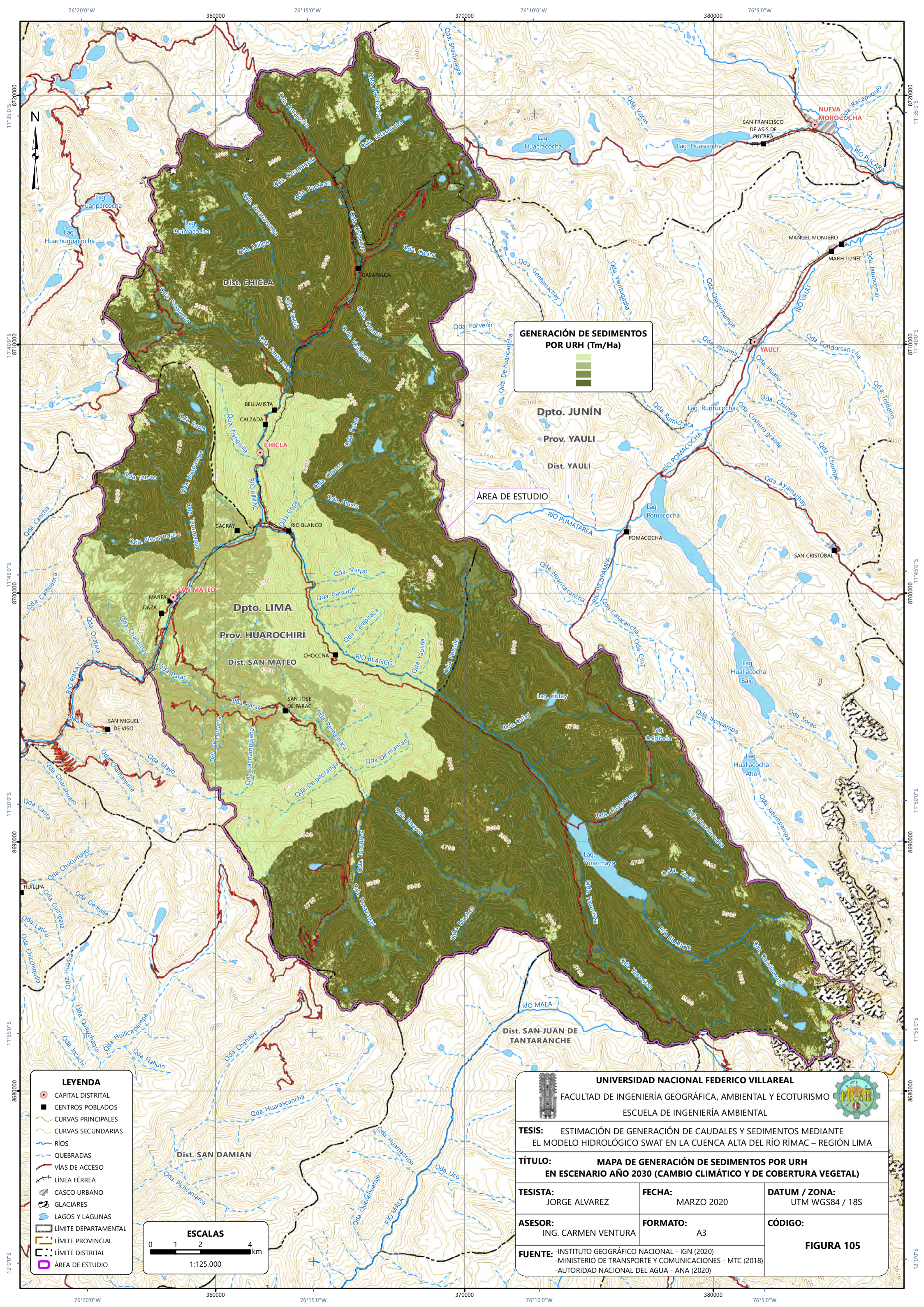
Figura de Mapa de generación de sedimentos por URH en escenario año 2030 (cambio climático y de cobertura vegetal) que muestra la distribución de generación de sedimentos por URH, notándose claramente las que más generan.

(Siguiente página)

Tabla 62.

Sedimentos medio anual por URH (primeros 50) en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.

URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
1163	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	520.22	2309.56
223	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	548.78	2181.9
182	6	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	205.08	1860.36
42	2	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	112.23	1858.66
109	4	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	194.55	1857.76
787	23	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	415.45	1759.49
6	1	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	132.97	1754.75
1004	27	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	280.52	1676.62
1039	28	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	382.14	1671.6
279	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	75.72	1621.33
1120	30	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	104.45	1599.92



GENERACIÓN DE SEDIMENTOS POR URH (Tm/Ha)

Legend for sediment generation levels:

- Lightest green: Lowest sediment generation
- Light green: Low sediment generation
- Medium green: Moderate sediment generation
- Dark green: High sediment generation
- Darkest green: Highest sediment generation

ÁREA DE ESTUDIO

LEYENDA

- CAPITAL DISTRITAL
- CENTROS POBLADOS
- CURVAS PRINCIPALES
- CURVAS SECUNDARIAS
- RÍOS
- QUEBRADAS
- VÍAS DE ACCESO
- LÍNEA FÉRREA
- CASCO URBANO
- GLACIARES
- LAGOS Y LAGUNAS
- LÍMITE DEPARTAMENTAL
- LÍMITE PROVINCIAL
- LÍMITE DISTRITAL
- ÁREA DE ESTUDIO

ESCALAS

0 1 2 4 km

1:125,000

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC – REGIÓN LIMA

TÍTULO: MAPA DE GENERACIÓN DE SEDIMENTOS POR URH EN ESCENARIO AÑO 2030 (CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COBERTURA VEGETAL)

TESISTA: JORGE ALVAREZ	FECHA: MARZO 2020	DATUM / ZONA: UTM WGS84 / 18S
ASESOR: ING. CARMEN VENTURA	FORMATO: A3	CÓDIGO: FIGURA 105

FUENTE: -INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL - IGN (2020)
 -MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES - MTC (2018)
 -AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2020)

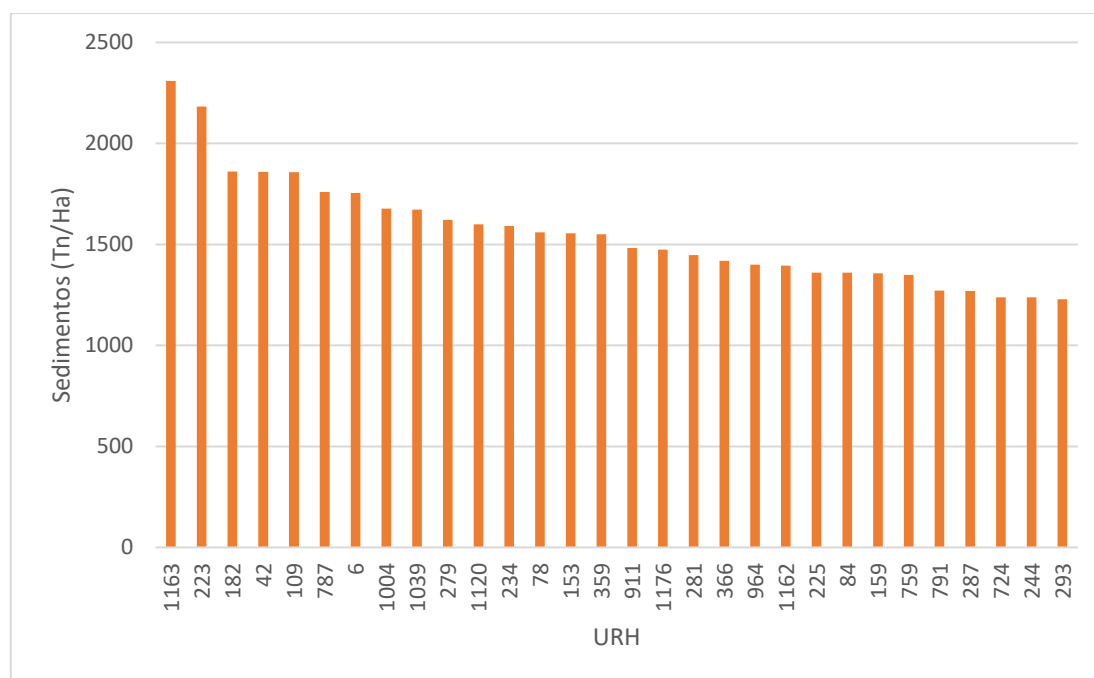
URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
234	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	34.02	1591.53
78	3	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	78.84	1559.7
153	5	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	66.73	1554.41
359	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	59.63	1550.18
911	25	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	148.31	1482.01
1176	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	20.48	1474.98
281	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	36.97	1447.14
366	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	29.59	1418.06
964	26	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	170.95	1399.91
1162	31	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	722.83	1394.48
225	7	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	806.97	1359.96
84	3	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	18.75	1359.74
159	5	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	13.69	1356.23
759	22	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	86.66	1348.57
791	23	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	30.92	1271.38
287	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	11.48	1268.98
724	21	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	316.00	1238.8
244	7	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	5.05	1237.76
293	8	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	AGRL	3.59	1229.31
390	11	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	263.63	1220.55
110	4	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	413.94	1216.33
179	6	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	303.83	1212.54
431	12	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	253.28	1209
15	1	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	9.50	1203.38
10	1	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	298.42	1195.31
1071	29	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	633.47	1192.21
376	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	AGRL	8.23	1190.92
368	10	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	7.91	1190.36
47	2	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	3.34	1190.25
80	3	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	296.09	1183.83
188	6	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	6.31	1174.85

URH	SUB-CUENCA	PENDIENTE (%)	SUELO	USO DE SUELO	ÁREA (km ²)	SEDIMENTOS (tn/Ha/año)
1185	31	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	PAST	3.30	1174.39
117	4	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	RNGB	4.17	1173.64
40	2	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	226.20	1165.27
543	16	75-9999	I-Kl-c-5533	SWRN	192.23	1144.6
278	8	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	196.28	1138.02
151	5	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	167.78	1112.75
316	9	75-9999	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	289.00	1107.44
1121	30	50-75	I-Bh-Tv-c-5518	SWRN	304.36	1084.33

Nota. URH de mayor generación de sedimentos.

Figura 106.

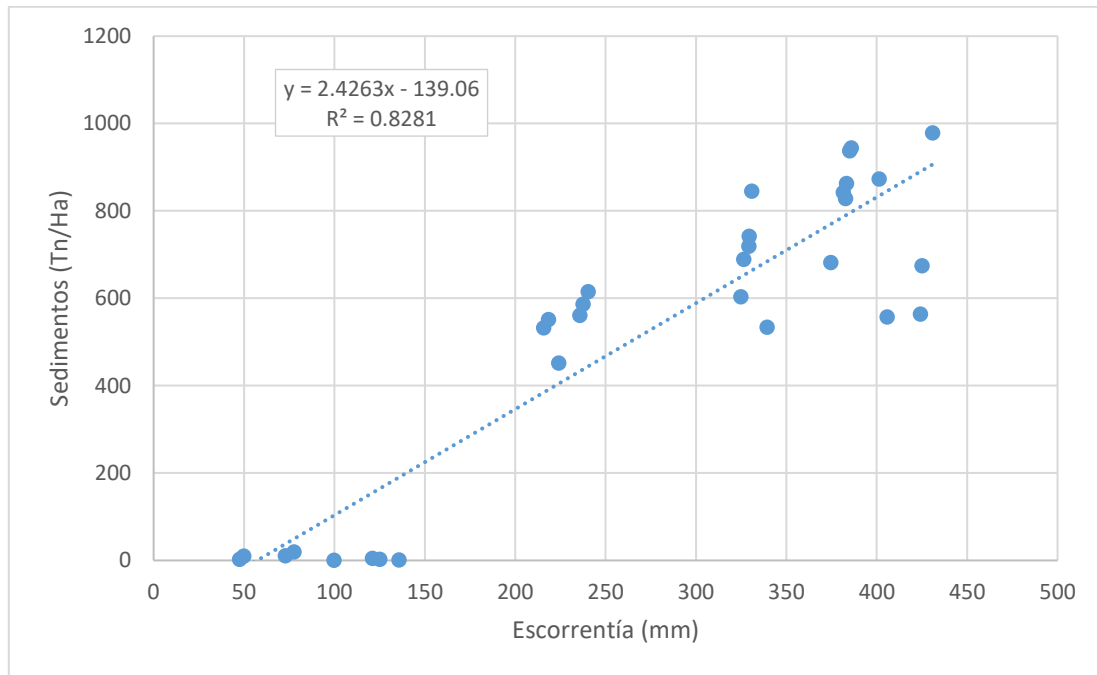
Sedimentos medio anual por URH (primeros 30) en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.



Se evidencia que los URH con mayor pendiente y de suelos con nula o poca vegetación son los que producen mayores sedimentos.

Figura 107.

Correlación lineal entre escorrentía y sedimentos por subcuenca en escenario con cambio climático y de cobertura vegetal.



4.3.4 Comparación entre escenarios

A continuación, se lista las comparaciones entre los resultados obtenidos del modelo / escenario base y los tres escenarios futuros para el año 2030.

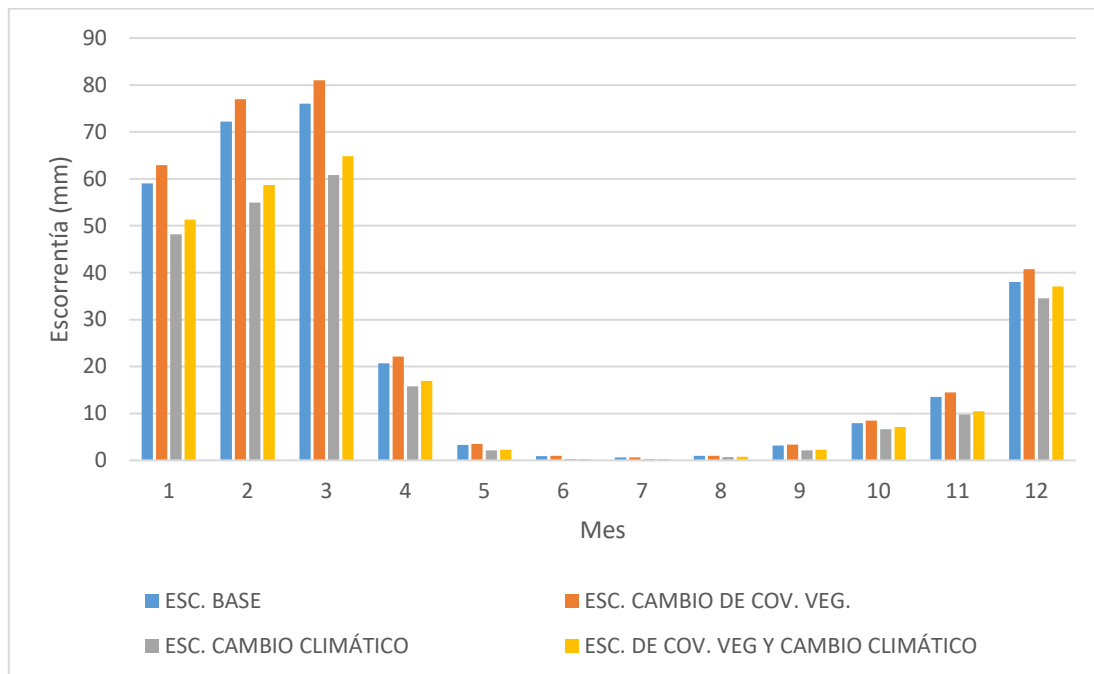
Tabla 63.

Comparación de resultados medios mensuales para los 4 escenarios de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio).

MES	ESCORRENTÍA EN ESC. BASE (mm)	SEDIMENTOS EN ESC. BASE (Tn/Ha)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO DE COV. VEG. (mm)	SEDIMENTOS EN ESC. CAMBIO DE COV. VEG. (Tn/Ha)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO (mm)	SEDIMENTOS EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO (Tn/Ha)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COV. VEG. (mm)	SEDIMENTOS EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COV. VEG. (Tn/Ha)
1	59.05	123.05	62.91	139.08	48.17	94.52	51.34	106.99
2	72.23	168.86	77.01	190.7	54.93	120.38	58.67	136.18
3	76.01	164.86	81.01	186.16	60.8	129.82	64.85	146.7
4	20.69	30.77	22.15	35.06	15.79	23.27	16.94	26.55
5	3.29	4.42	3.48	4.99	2.1	2.51	2.25	2.83
6	0.92	0.7	0.94	0.79	0.27	0.02	0.28	0.02
7	0.63	0.06	0.64	0.07	0.28	0.01	0.29	0.01
8	0.97	0.57	0.99	0.64	0.69	0.58	0.74	0.66
9	3.14	4.03	3.35	4.6	2.12	2.67	2.29	3.06
10	7.91	10.6	8.51	12.17	6.61	8.7	7.12	9.99
11	13.55	18.82	14.49	21.37	9.76	11.84	10.46	13.48
12	38.04	63.9	40.73	72.67	34.55	54.07	37.06	61.5

Figura 108.

Comparación de resultados de escorrentía medios mensuales para los 4 escenarios de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio).

**Figura 109.**

Comparación de resultados de sedimentos medios mensuales para los 4 escenarios de la cuenca alta del río Rímac (área de estudio).

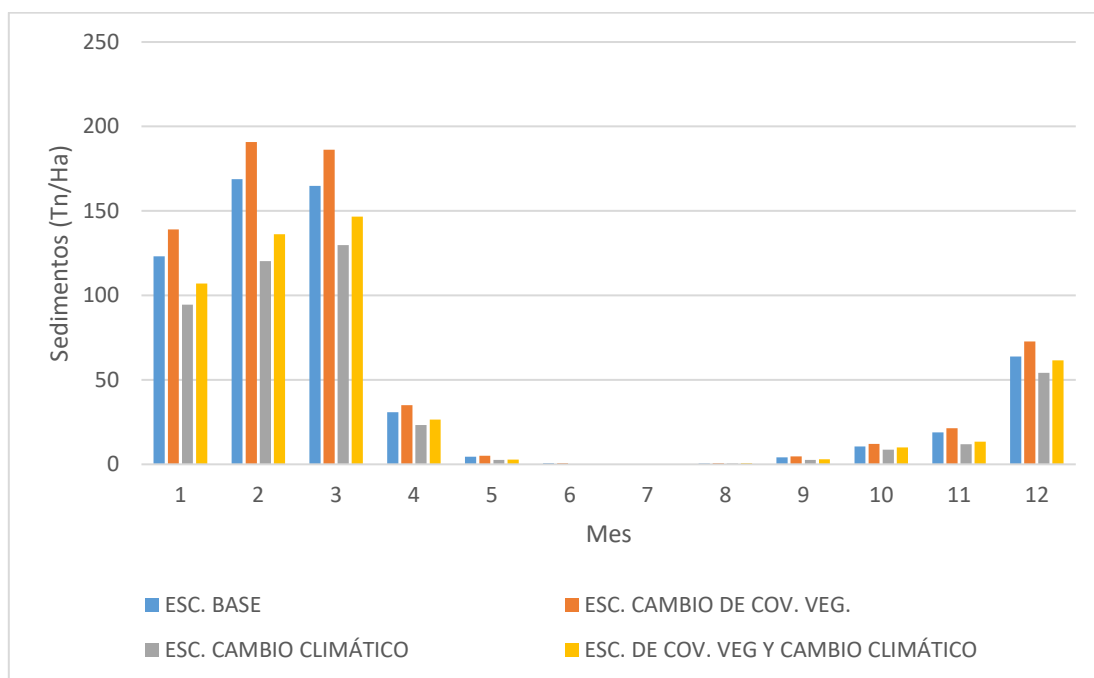


Tabla 64.*Comparación de caudales medios anuales para los 4 escenarios por subcuenca.*

SUBCUENCA	CAUDAL EN ESC. BASE (m ³ /s)	CAUDAL EN ESC. CAMBIO DE COV. VEG. (m ³ /s)	CAUDAL EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO (m ³ /s)	CAUDAL EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COV. VEG. (m ³ /s)
1	0.24	0.24	0.21	0.21
2	0.24	0.24	0.21	0.21
3	0.61	0.61	0.53	0.53
4	0.31	0.31	0.26	0.27
5	1.00	1.00	0.86	0.86
6	0.18	0.18	0.14	0.14
7	0.52	0.52	0.45	0.45
8	1.27	1.27	1.08	1.08
9	0.21	0.21	0.17	0.17
10	1.85	1.86	1.59	1.59
11	0.16	0.16	0.11	0.11
12	0.13	0.13	0.10	0.10
13	2.16	2.17	1.83	1.83
14	2.69	2.77	2.17	2.17
15	0.31	0.31	0.22	0.22
16	0.23	0.23	0.18	0.18
17	4.87	4.96	4.01	4.02
18	5.16	5.24	4.23	4.23
19*	6.09	6.18	4.96	4.97
20	2.38	2.46	1.95	1.95
21	0.19	0.19	0.13	0.13
22	1.98	2.06	1.66	1.66
23	0.26	0.26	0.21	0.21
24	0.93	0.93	0.73	0.73
25	1.61	1.69	1.36	1.36
26	1.42	1.42	1.13	1.14
27	0.24	0.24	0.20	0.20
28	0.41	0.41	0.34	0.34

SUBCUENCA	CAUDAL EN ESC. BASE (m ³ /s)	CAUDAL EN ESC. CAMBIO DE COV. VEG. (m ³ /s)	CAUDAL EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO (m ³ /s)	CAUDAL EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COV. VEG. (m ³ /s)
29	0.33	0.33	0.26	0.26
30	0.33	0.33	0.27	0.27
31	0.63	0.63	0.49	0.49

Nota. La subcuena 19 es la subcuena de captación de la cuenca alta del río Rímac. Se considera el punto de captación de cada subcuena, y no su generación independiente. Por lo tanto, las subcuenas inferiores tendrán mayor caudal que las superiores.

Figura 110.

Comparación de caudales medios anuales para los 4 escenarios por subcuena.

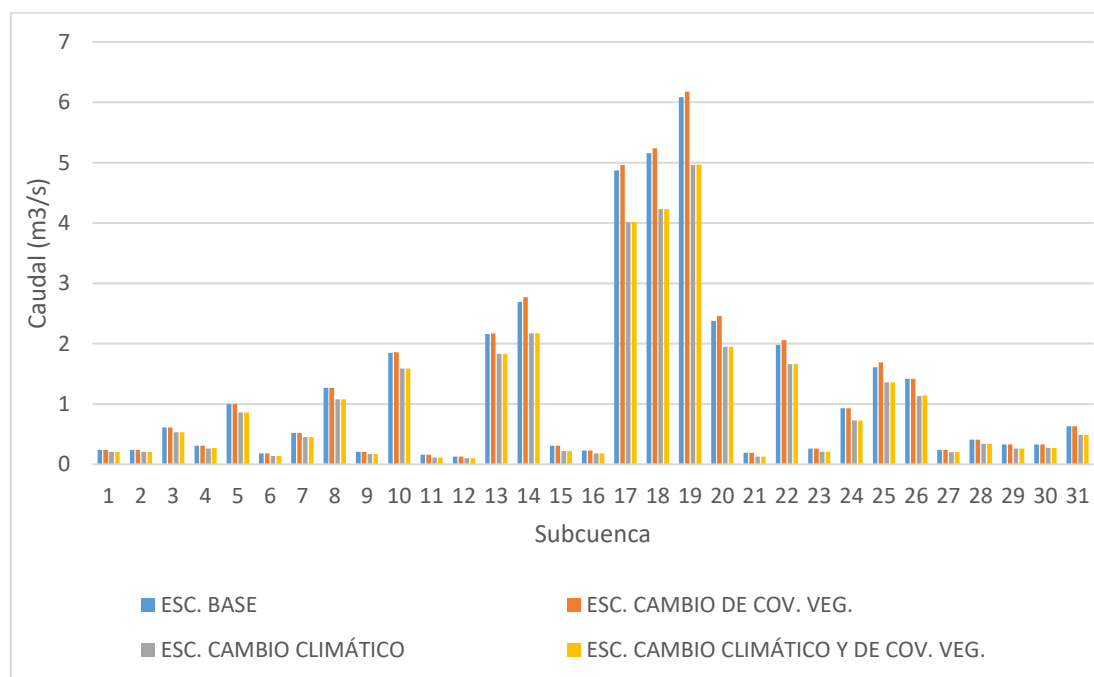


Tabla 65.

Comparación de escorrentía media anual para los 4 escenarios por subcuena.

SUBCUENCA	ESCORRENTÍA EN ESC. BASE (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO DE COV. VEG. (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COV. VEG. (mm)
1	488	490	422	425

SUBCUENCA	ESCORRENTÍA EN ESC. BASE (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO DE COV. VEG. (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COV. VEG. (mm)
2	485	486	422	424
3	447	448	381	382
4	443	444	373	375
5	442	443	383	383
6	478	478	383	383
7	494	495	430	431
8	443	443	385	385
9	273	274	223	224
10	444	444	386	386
11	339	339	237	238
12	333	333	240	240
13	141	141	100	100
14	174	174	136	136
15	163	163	125	125
16	272	272	218	218
17	112	112	78	78
18	81	81	50	50
19	78	77	48	48
20	169	169	121	121
21	335	336	235	236
22	400	400	329	329
23	404	405	330	331
24	103	104	72	73
25	396	396	324	325
26	421	415	337	339
27	400	402	328	329
28	397	398	325	326
29	270	271	215	216
30	488	489	405	406

SUBCUENCA	ESCORRENTÍA EN ESC. BASE (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO DE COV. VEG. (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COV. VEG. (mm)
31	515	516	400	401

Figura 111.

Comparación de escorrentía media anual para los 4 escenarios por subcuenca.

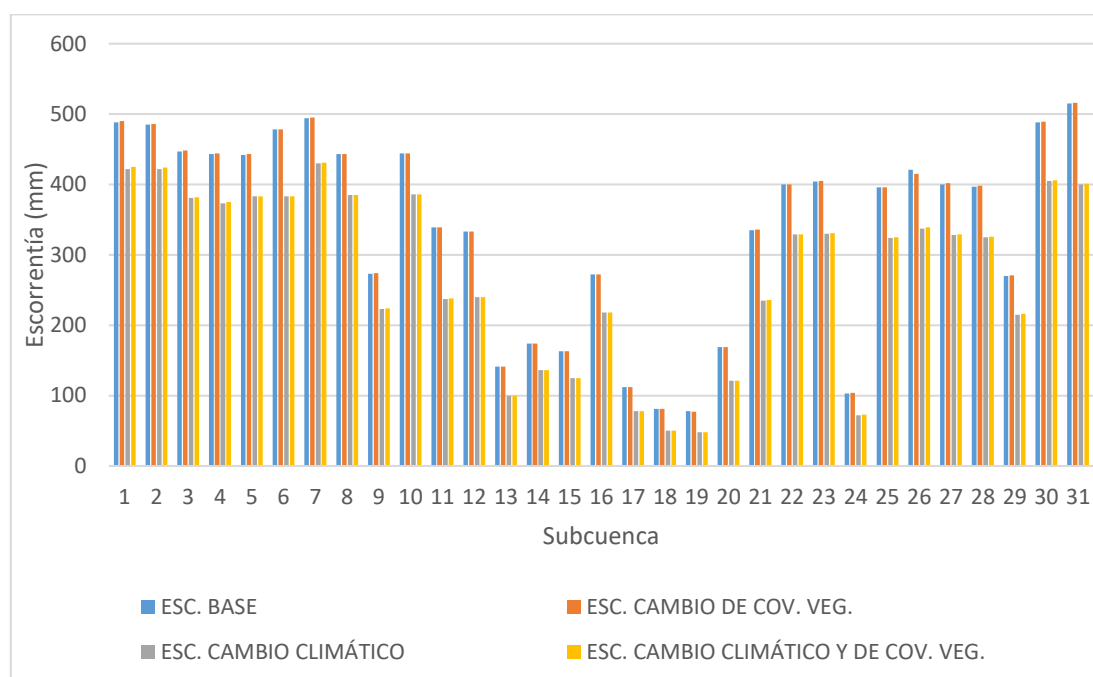


Tabla 66.

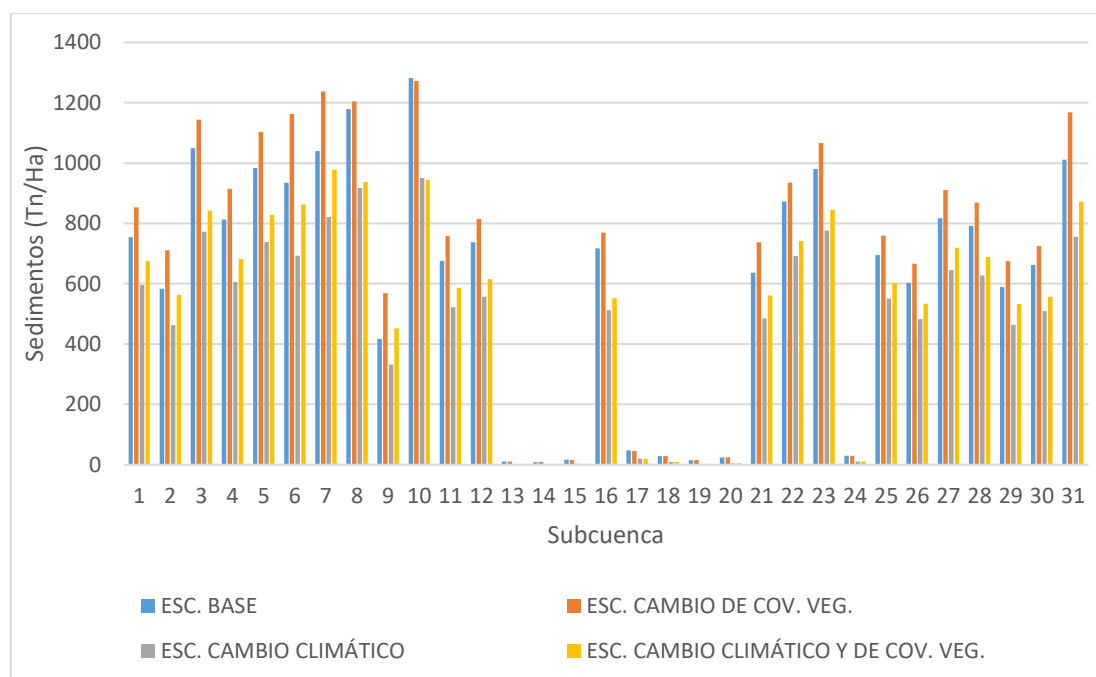
Comparación de Sedimentos media anual para los 4 escenarios por subcuenca.

SUBCUENCA	SEDIMENTOS EN ESC. BASE (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. CAMBIO DE COV. VEG. (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COV. VEG. (Tn/Ha)
1	754.04	853.37	595.99	674.38
2	583.57	710.37	463.03	563.59
3	1049.18	1143.78	772.20	841.94
4	812.53	914.25	605.99	681.72
5	983.13	1103.82	738.02	828.47
6	934.82	1163.49	693.19	862.72

SUBCUENCA	SEDIMENTOS EN ESC. BASE (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. CAMBIO DE COV. VEG. (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COV. VEG. (Tn/Ha)
7	1039.37	1237.55	821.75	978.51
8	1179.03	1204.34	917.63	937.43
9	417.09	568.31	331.52	451.71
10	1281.80	1272.22	950.96	943.86
11	675.61	758.72	522.44	586.59
12	737.35	814.34	557.07	615.21
13	9.98	10.41	0.18	0.26
14	8.30	8.91	0.68	0.76
15	16.32	15.72	2.45	2.39
16	716.80	769.01	512.40	551.14
17	47.47	45.11	20.22	19.26
18	28.64	28.44	9.74	9.70
19	15.16	16.04	2.01	2.14
20	24.20	24.63	4.53	4.63
21	636.88	737.42	484.67	561.03
22	871.70	934.91	691.39	741.73
23	980.85	1066.86	776.72	845.02
24	29.43	29.70	10.34	10.33
25	694.65	760.08	551.07	603.08
26	602.45	666.12	482.39	533.50
27	817.39	910.59	645.51	719.35
28	791.10	868.79	626.87	688.76
29	588.30	675.06	464.06	532.46
30	662.26	724.60	509.05	556.95
31	1011.48	1168.68	755.35	872.59

Figura 112.

Comparación de Sedimentos media anual para los 4 escenarios por subcuenca.

**Tabla 67.**

Comparación de sedimentos media anual para los 4 escenarios por URH

RANGO DE SEDIMENTOS POR URH (Tn/Ha)	ÁREA EN ESC. BASE (km ²)	ÁREA EN ESC. CAMBIO DE COV. VEG. (km ²)	ÁREA EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO (km ²)	ÁREA EN ESC. CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COV. VEG. (km ²)
< 10	75.93	46.16	159.87	132.69
10 - 50	119.62	121.61	46.87	46.36
50 - 200	44.88	41.09	41.69	44.34
> 200	349.16	380.74	341.17	366.21

Figura 113.

Comparación de sedimentos media anual para los 4 escenarios por URH

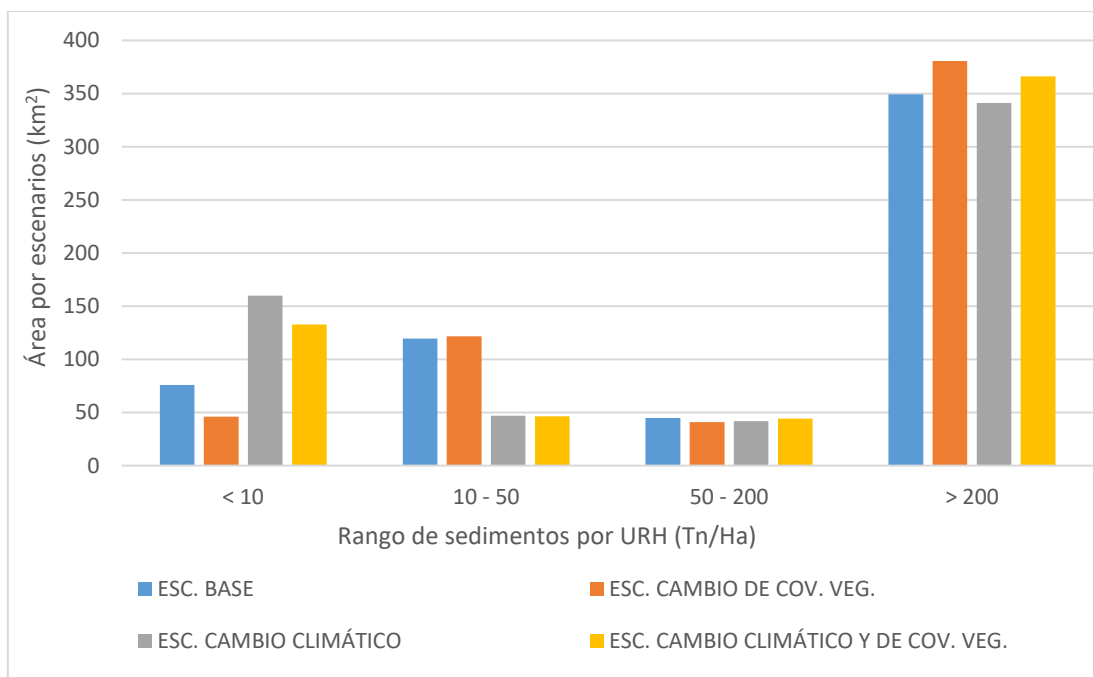


Tabla 68.

Relación entre la escorrentía y sedimentos en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario base a través del tiempo.

AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)	SEDIMENTOS (Tn/Ha)
1984	917	1023.2
1985	595	529.2
1986	752	749.4
1987	587	513.4
1988	666	583.1
1989	750	833.6
1990	523	324.7
1991	471	357.4
1992	336	206.9
1993	796	713.5
1994	801	779.6
1995	676	616.0
1996	649	581.5
1997	582	440.6

AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)	SEDIMENTOS (Tn/Ha)
1998	658	613.2
1999	792	702.7
2000	798	775.4
2001	795	690.0
2002	714	606.2
2003	620	523.9
2004	635	443.1
2005	507	393.0
2006	763	613.5
2007	696	662.6
2008	654	507.3
2009	923	772.8
2010	716	578.0
2011	929	977.2
2012	808	688.5
2013	764	711.6
2014	784	668.2
2015	646	525.2
2016	552	522.3

Figura 114.

Relación entre la escorrentía y sedimentos en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario base a través del tiempo.

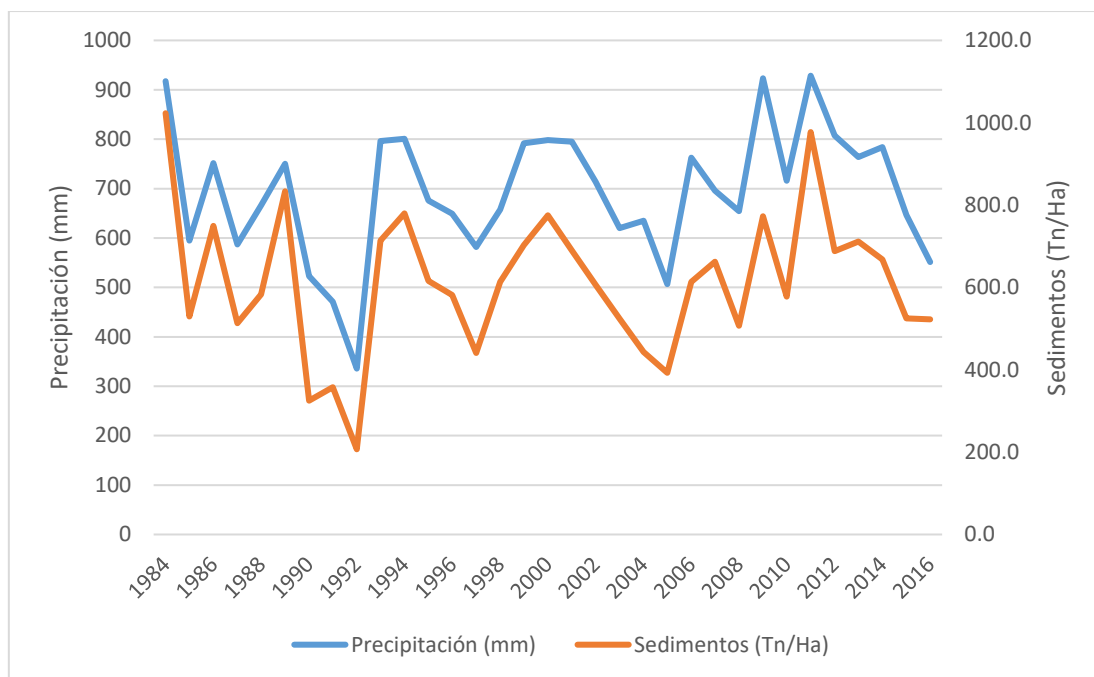


Tabla 69.

Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rimac (Área de estudio) en el escenario de cambio de cobertura vegetal.

AÑO	PRECIPITACIÓN N (mm)	SEDIMENTOS (Tn/Ha)
2021	668	716.9
2022	443	330.9
2023	758	785.3
2024	630	608.4
2025	795	806.3
2026	656	585.3
2027	655	620.7
2028	764	692.2
2029	833	884.4
2030	661	638.6

Figura 115.

Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rimac (Área de estudio) en el escenario de cambio de cobertura vegetal.

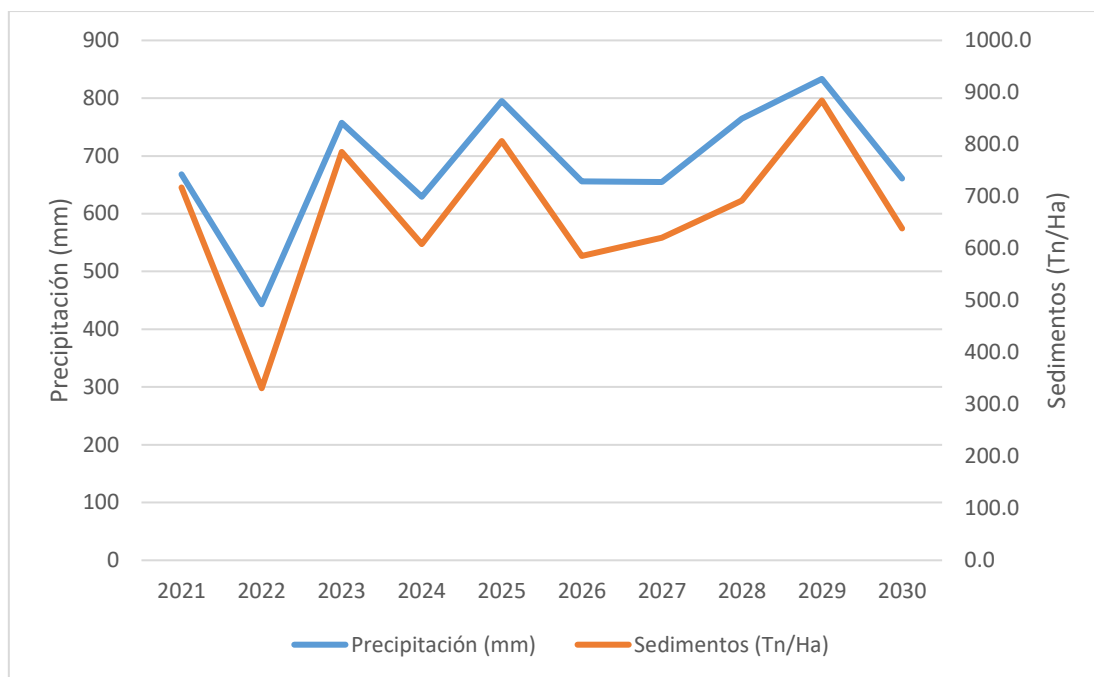


Tabla 70.

Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario de cambio climático.

AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)	SEDIMENTOS (Tn/Ha)
2021	592	487.3
2022	554	354.3
2023	785	545.8
2024	609	381.6
2025	789	706.4
2026	685	480.8
2027	649	515.4
2028	671	482.2
2029	545	379.4
2030	467	350.4

Figura 116.

Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario de cambio climático.

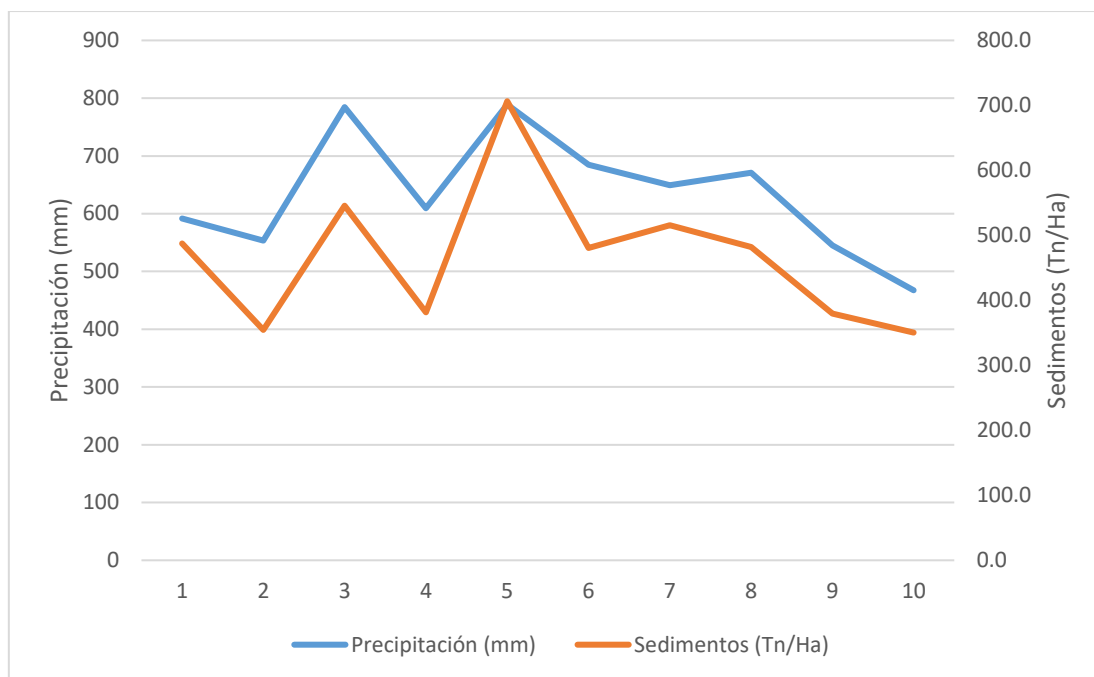


Tabla 71.

Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario de cambio climático y de cobertura vegetal.

AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)	SEDIMENTOS (Tn/Ha)
2021	592	543.6
2022	554	396.8
2023	785	610.1
2024	609	426.8
2025	789	788.0
2026	685	537.3
2027	649	575.6
2028	671	538.0
2029	545	424.7
2030	467	391.7

Figura 117.

Relación entre la escorrentía y sedimentos a través del tiempo en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio) en el escenario de cambio climático y de cobertura vegetal.

**Tabla 72.**

Comparación a través del tiempo de los resultados de caudales para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).

AÑO	CAUDALES EN ESC. BASE (m ³ /s)	CAUDALES EN ESC. DE CAMBIO DE COB. VEG. (m ³ /s)	CAUDALES EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO (m ³ /s)	CAUDALES EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COB. VEG. (m ³ /s)
1984	9.37	-	-	-
1985	5.48	-	-	-
1986	7.57	-	-	-
1987	5.19	-	-	-
1988	5.17	-	-	-
1989	8.16	-	-	-
1990	3.21	-	-	-
1991	3.51	-	-	-
1992	1.93	-	-	-
1993	6.26	-	-	-
1994	7.44	-	-	-
1995	5.59	-	-	-

AÑO	CAUDALES EN ESC. BASE (m ³ /s)	CAUDALES EN ESC. DE CAMBIO DE COB. VEG. (m ³ /s)	CAUDALES EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO (m ³ /s)	CAUDALES EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COB. VEG. (m ³ /s)
1996	6.11	-	-	-
1997	4.25	-	-	-
1998	5.61	-	-	-
1999	6.96	-	-	-
2000	7.71	-	-	-
2001	7.75	-	-	-
2002	5.86	-	-	-
2003	5.29	-	-	-
2004	4.74	-	-	-
2005	3.89	-	-	-
2006	6.72	-	-	-
2007	6.65	-	-	-
2008	5.68	-	-	-
2009	8.44	-	-	-
2010	6.32	-	-	-
2011	9.25	-	-	-
2012	7.64	-	-	-
2013	7.17	-	-	-
2014	6.44	-	-	-
2015	5.36	-	-	-
2016	4.13	-	-	-
2021	-	6.26	4.92	4.92
2022	-	2.93	4.15	4.14
2023	-	6.55	6.14	6.19
2024	-	5.41	4.69	4.72
2025	-	7.57	6.60	6.67
2026	-	5.39	5.55	5.52
2027	-	5.84	5.37	5.38
2028	-	6.91	4.88	4.89

AÑO	CAUDALES EN ESC. BASE (m ³ /s)	CAUDALES EN ESC. DE CAMBIO DE COB. VEG. (m ³ /s)	CAUDALES EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO (m ³ /s)	CAUDALES EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COB. VEG. (m ³ /s)
2029	-	8.11	4.07	4.06
2030	-	5.39	3.24	3.21

Figura 118.

Comparación a través del tiempo de los resultados de caudales para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).

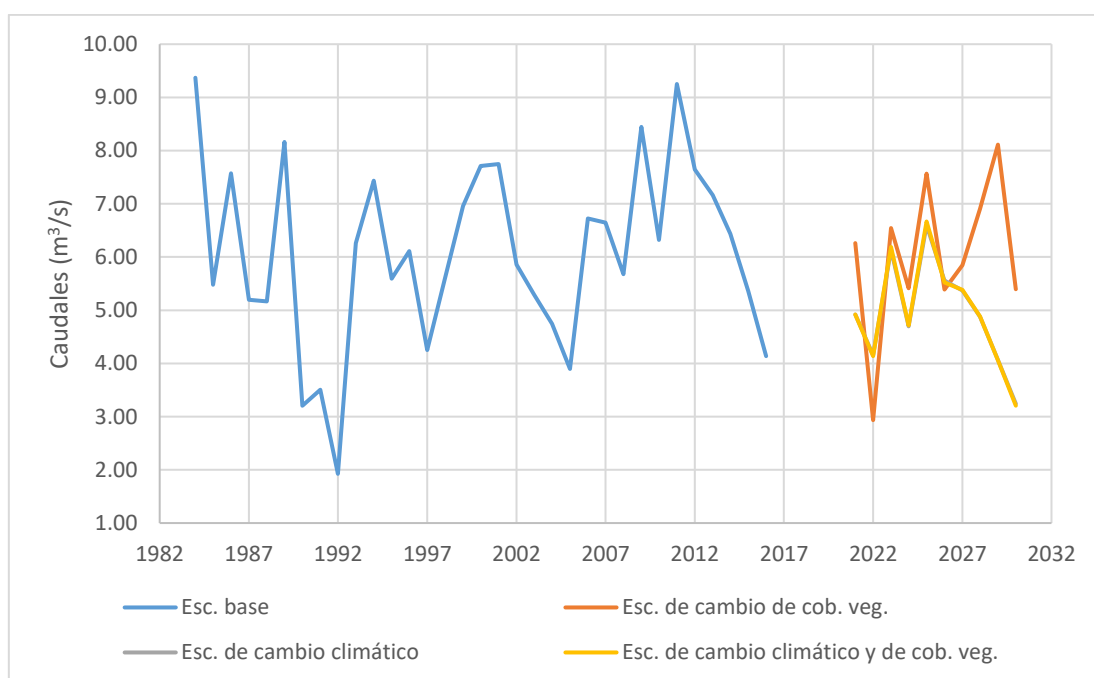


Tabla 73.

Comparación a través del tiempo de los resultados de escorrentía para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).

AÑO	ESCORRENTÍA EN ESC. BASE (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. DE CAMBIO DE COB. VEG. (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COB. VEG. (mm)
1984	520	-	-	-
1985	287	-	-	-
1986	405	-	-	-

AÑO	ESCORRENTÍA EN ESC. BASE (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. DE CAMBIO DE COB. VEG. (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COB. VEG. (mm)
1987	270	-	-	-
1988	306	-	-	-
1989	433	-	-	-
1990	194	-	-	-
1991	190	-	-	-
1992	107	-	-	-
1993	388	-	-	-
1994	400	-	-	-
1995	321	-	-	-
1996	316	-	-	-
1997	251	-	-	-
1998	312	-	-	-
1999	393	-	-	-
2000	428	-	-	-
2001	411	-	-	-
2002	330	-	-	-
2003	285	-	-	-
2004	263	-	-	-
2005	210	-	-	-
2006	371	-	-	-
2007	351	-	-	-
2008	315	-	-	-
2009	480	-	-	-
2010	335	-	-	-
2011	520	-	-	-
2012	414	-	-	-
2013	384	-	-	-
2014	380	-	-	-
2015	287	-	-	-

AÑO	ESCORRENTÍA EN ESC. BASE (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. DE CAMBIO DE COB. VEG. (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO (mm)	ESCORRENTÍA EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COB. VEG. (mm)
2016	244	-	-	-
2021	-	337	264	265
2022	-	164	226	226
2023	-	370	351	352
2024	-	293	244	244
2025	-	411	373	374
2026	-	293	293	294
2027	-	311	286	287
2028	-	377	289	290
2029	-	440	211	212
2030	-	304	185	185

Figura 119.

Comparación a través del tiempo de los resultados de escorrentía para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).

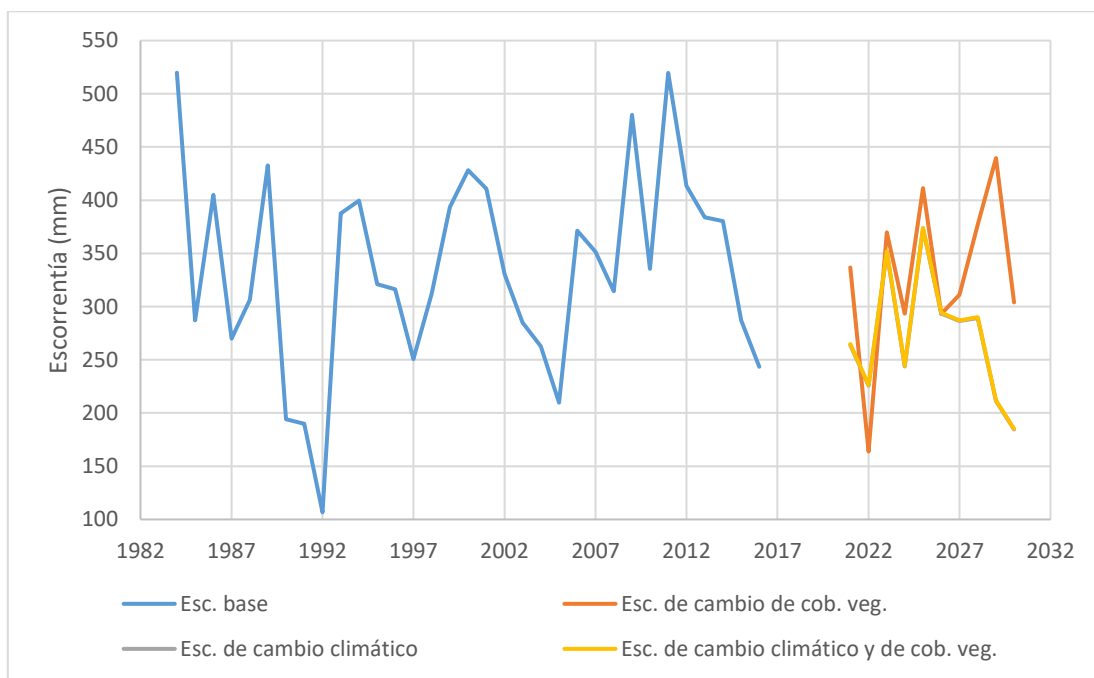


Tabla 74.

Comparación a través del tiempo de los resultados de sedimentos para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).

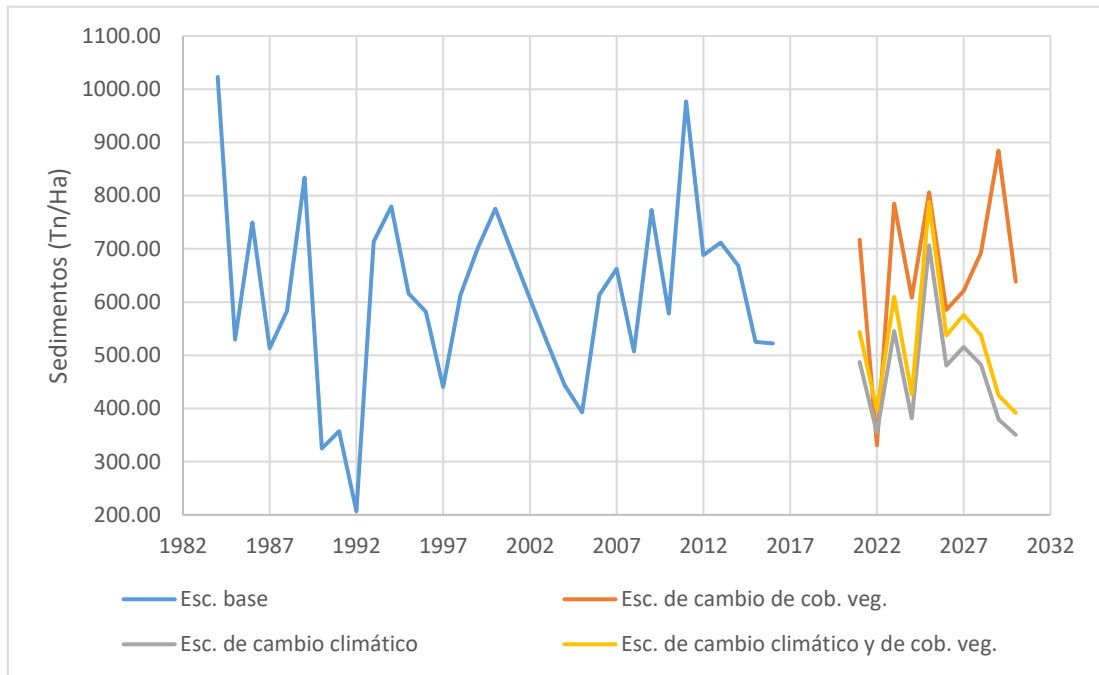
AÑO	SEDIMENTOS EN ESC. BASE (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. DE CAMBIO DE COB. VEG. (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COB. VEG. (Tn/Ha)
1984	1023.16	-	-	-
1985	529.23	-	-	-
1986	749.36	-	-	-
1987	513.43	-	-	-
1988	583.05	-	-	-
1989	833.57	-	-	-
1990	324.74	-	-	-
1991	357.43	-	-	-
1992	206.88	-	-	-
1993	713.49	-	-	-
1994	779.61	-	-	-
1995	615.98	-	-	-
1996	581.47	-	-	-
1997	440.62	-	-	-
1998	613.21	-	-	-
1999	702.68	-	-	-
2000	775.43	-	-	-
2001	690.03	-	-	-
2002	606.22	-	-	-
2003	523.90	-	-	-
2004	443.07	-	-	-
2005	393.00	-	-	-
2006	613.54	-	-	-
2007	662.63	-	-	-
2008	507.26	-	-	-
2009	772.85	-	-	-
2010	578.03	-	-	-

AÑO	SEDIMENTOS EN ESC. BASE (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. DE CAMBIO DE COB. VEG. (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO (Tn/Ha)	SEDIMENTOS EN ESC. DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE COB. VEG. (Tn/Ha)
2011	977.18	-	-	-
2012	688.46	-	-	-
2013	711.58	-	-	-
2014	668.20	-	-	-
2015	525.19	-	-	-
2016	522.27	-	-	-
2021	-	716.94	487.29	543.58
2022	-	330.90	354.28	396.81
2023	-	785.28	545.80	610.10
2024	-	608.40	381.65	426.81
2025	-	806.30	706.44	787.99
2026	-	585.35	480.76	537.34
2027	-	620.74	515.37	575.60
2028	-	692.18	482.23	538.00
2029	-	884.40	379.44	424.75
2030	-	638.61	350.42	391.67

Figura 120.

Comparación a través del tiempo de los resultados de sedimentos para los 4 escenarios en la cuenca alta del río Rímac (Área de estudio).

2



V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Los parámetros hallados en el presente estudio son cercanos a los propuestos en el estudio “*Regional Parameter Estimation of the SWAT Model: Methodology and Application to River Basins in the Peruvian Pacific Drainage*” (Asurza-Véliz, 2020) para las cuencas andinas del Pacífico central.
- Tal como lo mencionan diversos estudios como “*Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca mediante el uso del modelo SWAT*” (Salas, 2019) el modelo SWAT permite ubicar las zonas con un alto grado de erosión y proponer medidas de mitigación según las características de cada zona, como la reforestación, la construcción de estructuras hidráulicas y la tecnificación de cultivos. Estas medidas contemplan el fomento del desarrollo local, mejorando la competitividad y el crecimiento de la cuenca alta del río Rímac.
- Los resultados del modelo SWAT para el futuro escenario climático desfavorable con menor precipitación promedio muestra una tasa de infiltración moderadamente rápida, en este sentido, se aprecia una reducción de la regulación hídrica en la cuenca alta del río Rímac tal como lo sugiere el estudio “*Desarrollo de un sistema de monitoreo para la evaluación de intervenciones en la infraestructura natural por medio de la observación de la tierra*” (Villar, 2022).

VI: CONCLUSIONES

- Los resultados del modelo se consideran válidos al mostrar los caudales una buena correlación de calibración con la información hidrométrica de campo con $R^2 = 0.75$, Nash = 0.70 y PBias = +14.9%.
- El actual escenario climático y de cobertura vegetal base genera un caudal medio anual en el área de estudio de 6.09 m³/s; y una generación de sedimentos media anual de 586.41 Tm/Ha. La subcuenca 10 es la de mayor generación de sedimentos con 1281.8 Tm/Ha.
- Un futuro escenario climático y de cobertura vegetal al año 2030 influye frente al escenario base en la generación de caudales y sedimentos medios anuales:
 - Futuro escenario de cobertura vegetal únicamente: Caudal de 6.18 m³/s (+1.48%) en el área de estudio; sedimentos de 663.53 Tm/Ha (+13.15%) en el área de estudio y de 1272.22 Tm/Ha (-0.75%) en la 'subcuenca 10 con mayor generación.
 - Futuro escenario climático únicamente: Caudal de 4.96 m³/s (-18.56%) en el área de estudio; Sedimentos de 449.24 Tm/Ha (-23.39%) en el área de estudio y de 950.96 Tm/Ha (-25.81%) en la 'subcuenca 10 con mayor generación.
 - Futuro escenario climático y de cobertura vegetal: Caudal de 4.97 m³/s (-18.39%) en el área de estudio; Sedimentos de 508.95 Tm/Ha (-13.21%) en el área de estudio y de 978.51 Tm/Ha (-23.66%) en la subcuenca 7 con mayor generación.

VII: RECOMENDACIONES

- Para revalidar la eficacia del modelo se puede reconfigurar con información más precisa de pago en vez de la información libre gratuita. También es válido mejorar la información de suelos mediante campañas de calicatas.
- Estimar la influencia sobre los caudales y sedimentos medios con los actuales escenarios climáticos y de cobertura vegetal en diversas cuencas del país para apreciar la versatilidad del modelo SWAT. Repetir el modelo con diversas coberturas vegetales para encontrar el escenario teórico estimado con mayor generación de caudales y menor producción de sedimentos.
- Aplicar políticas con los resultados futuros evaluados con el fin de proteger las subcuencas proyectadas de mayor generación de caudales y reducir sus sedimentos. La principal autoridad interesada es el Consejo de Recursos Hídricos de la Cuenca Chillón - Rímac - Lurín. Realizar estudios de cambio climático a nivel local para reconfigurar el modelo con un escenario climático futuro más preciso.

VIII: REFERENCIAS

- Asurza-Vélizet F. y Lavado-Casimiro W. (2020). *Regional Parameter Estimation of the SWAT Model: Methodology and Application to River Basins in the Peruvian Pacific Drainage*. SENAMHI. Repositorio Institucional SENAMHI.
<https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/654/Regional-Parameter-Estimation-SWAT-Model-Methodology-Application-River-Basins-Peruvian-Pacific-Drainage.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aybar, C., Lavado-Casimiro, W. Huerta, A., Fernández, C., Vega-Jácome, F., Sabino, E. y Felipe-Obando, O. (2017). *Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico*. SENAMHI. Repositorio Institucional SENAMHI.
<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/260>
- Chadli, K. (2018). *Hydrological modeling of the Mikkés watershed (Morocco) using ARCSWAT model*. Springer Link. Repositorio Springer Link.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-017-0145-0>
- CIREN. (2010). *Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile*. InnovaChile Corfo. Biblioteca Digital CIREN.
<https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/2102/PC14010.pdf?sequence=1>
- Cuadro, J. (2020). *Modelamiento hidrológico de la subcuenca del río Pachachaca con precipitación proveniente de satélite, Departamento de Apurímac*. CONCYTEC. Repositorio Alicia CONCYTEC.

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_84645f7d7197f6ad91ae8a3095943ac9

Gallo, K., Lara, R. y Iza, B. (2018). *Modelamiento con SWAT y GR2M para la subcuenca del río Guayllabamba* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio UTC. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6372?mode=full>

Gutierrez, D. y Osorio, L. (2018). *Modelo de sequía en la quebrada aguas claras en el municipio de San Bernardo Cundinamarca a través del programa hidrológico SWAT mediante aplicación de herramientas digitales UAVS* [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/16598>

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Education.

Hudson, N. (1997). *Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía*. FAO.

JAXA/METI. (2015). *DEM Alos Palsar*. Alaska Satellite Facility. <https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar/>

Kazi-Rahman [Mahmud]. (29 de Julio de 2012). *Blog de Mahmud Geneva: SWAT Model*. <http://nil-pipraen.blogspot.pe/search/label/SWAT%20Model>

Khayyun, S., Alwan, I. y Hayder A. (2019). *Hydrological model for Hemren dam reservoir catchment area at the middle River Diyala reach in Iraq using ArcSWAT model*. Springer Link. Repositorio Springer Link. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-019-1010-0>

- Mohammed, I. N. (2022). *Diagnosing challenges and setting priorities for sustainable water resource management under climate change*. Nature Journal.
<https://www.nature.com/articles/s41598-022-04766-2>
- Montecelos, Y. (2018). *Modelación del efecto de la variación climática en el balance hídrico en dos cuencas (México y Cuba) bajo un escenario de cambio climático* [Tesis de doctorado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio CICESE.
https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2531/1/tesis_Montecelos%20Zamora_Yalina_26_oct_2018.pdf
- Oliveira, A., Silva, M., Ferreira, T., Paiva, L., dos Santos, C., Meiguins, A., Rodrigues, V., Salviano, F. y Cardos, G. (2021). *Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model*. ScienceDirect . Repositorio ScienceDirect.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001627921000196>
- OpenStreetMap contributors. (2020). *OpenStreetMap*. Mapas libres de OpenStreetMap.
<https://www.openstreetmap.org>
- Quispe, K. y Huanca, C. (2021). *Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca Ilave bajo escenarios del cambio climático* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. Repositorio UPeU. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/4879>
- Salas, M. (2019). *Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca mediante el uso del modelo SWAT* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/16823>

- SENAMHI (2017). *Información hidrológica en las estaciones Río Blanco, San Mateo y Tamboraque*. Portal del SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe>
- SENAMHI (2020). *Información climática en las estaciones Matucana, Pachachaca, Pomacocha, Río Blanco, San José de Parac y Yuracmayo*. Portal del SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe>
- Sok, T., Oeurng, C., Ich, I., Sauvage, S. y Sánchez-Pérez, J. (2020). *Assessment of Hydrology and Sediment Yield in the Mekong River Basin Using SWAT Model*. WATER. Repositorio SWAT. https://www.card.iastate.edu/swat_articles/show-details/?a=5380
- Swain, J. (2019). *Impact assessment of land use / land cover and climate change on streamflow regionalization in an ungauged catchment*. Repositorio MDPI. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3503>
- Villar, F. (2022). *Desarrollo de un sistema de monitoreo para la evaluación de intervenciones en la infraestructura natural por medio de la observación de la tierra*. Autoridad Nacional del Agua. Repositorio ANA. https://premioculturaagua.ana.gob.pe/PreguntaImagen/2022_12_15_16_24_14_Producto%20Final%20Fabrizzio%20VILLAR%20aprobado.pdf
- Xu, Y., Wang, S., Bai, X., Shu, D. y Tian, Y. (2018). *Runoff response to climate change and human activities in a typical karst watershed, SW China*. PLOS ONE. Repositorio PLOS ONE. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0193073>

Zhang L. Wang, C., Liang, G., Cui, Y. y Zhang, Q. (2020). *Influence of Land Use Change on Hydrological Cycle: Application of SWAT to Su-Mi-Huai Area in Beijing, China.*

Repositorio MDPI. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/11/3164>

IX: ANEXOS

9.1 Panel fotográfico

Fotografía 1. Vegetación escasa a estéril en centro poblado Casapalca. Lat.: 11° 39' 10.24" S, Long.: 76° 14' 12.19" W, Altitud: 4189 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 2. Centro poblado minero Casapalca. Lat.: 11° 39' 10.04" S, Long.: 76° 14' 11.81" W, Altitud: 3954 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 3. Canal y tubería de desagüe con caudal aprox. de 1.20 m³/s en Casapalca. Lat.: 11° 39' 8.77" S, Long.: 76° 14' 10.50" W, Altitud: 3954 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 4. Río Rímac canalizado con caudal aprox. de 3.5 m³/s en Casapalca. Lat.: 11° 39' 8.31" S, Long.: 76° 14' 14.36" W, Altitud: 4183 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 5. Río Rímac canalizado en Casapalca, fotos grupales. Lat.: 11° 39' 8.31" S, Long.: 76° 14' 14.36" W, Altitud: 4176 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 6. Centro poblado minero de Casapalca, Ferrocarril Central y paisaje con vegetación nula a estéril. Lat.: 11° 39' 8.05" S, Long.: 76° 14' 14.60" W, Altitud: 4177 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 7. Zona de acopio de material excedente del ferrocarril en Casapalca. Lat.: 11° 39' 8.05" S, Long.: 76° 14' 14.60" W, Altitud: 4177 msnm.



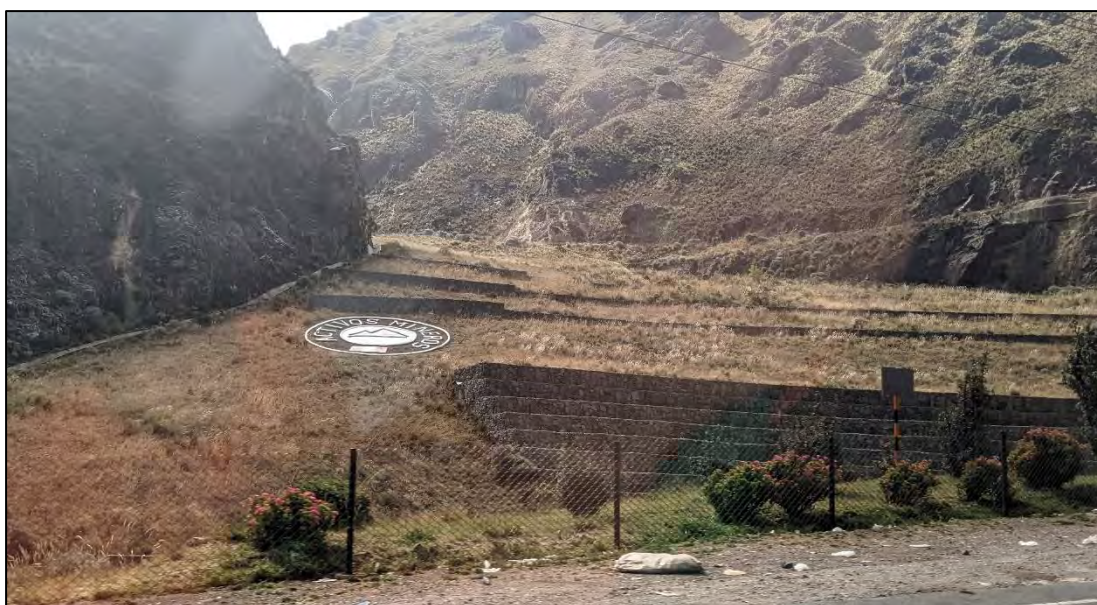
Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 8. Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas. Lat.: 11° 39' 13.51" S, Long.: 76° 14' 20.68" W, Altitud: 4186 msnm.



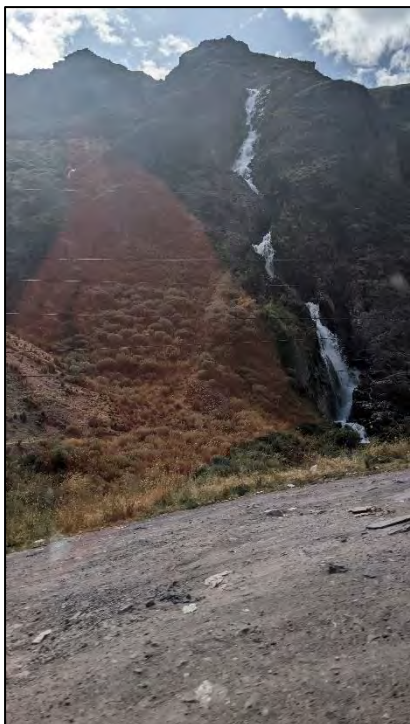
Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 9. Montañas con vegetación nula a escasa y estructura de reforzamiento de pendiente. Lat.: 11° 39' 45.38" S, Long.: 76° 14' 43.92" W, Altitud: 4186 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 10. Pequeña quebrada en las cercanías de Casapalca. Lat.: 11° 40' 3.75" S, Long.: 76° 15' 12.16" W, Altitud: 4186 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 11. Piezómetro clausurado en el río Rímac. Lat.: 11° 41' 33.58" S, Long.: 76° 15' 59.02" W, Altitud: 3828 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 12. Vegetación de arbusto / matorral en río Blanco. Lat.: 11° 44' 5.52" S, Long.: 76° 15' 29.03" W, Altitud: 3548 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 13. Viviendas cercanas y puente rústico sobre río Blanco. Lat.: 11° 41' 38.66" S, Long.: 76° 15' 58.46" W, Altitud: 3814 msnm.



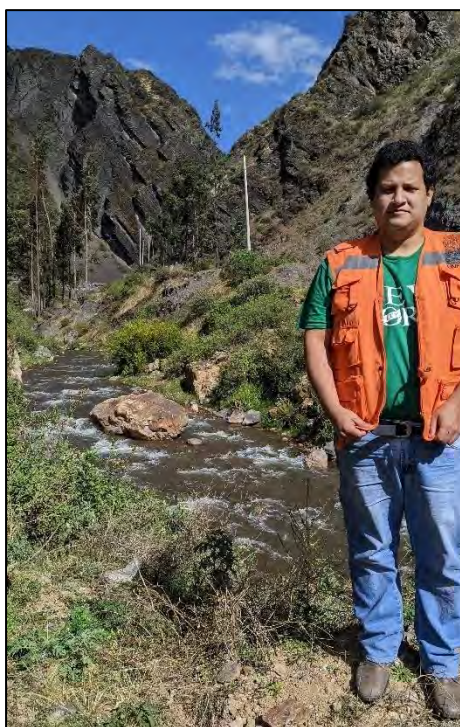
Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 14. Puente del ferrocarril central por centro poblado río Blanco. Lat.: 11° 44' 11.70" S, Long.: 76° 15' 25.53" W, Altitud: 3542 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 15. Río Blanco con caudal aprox. de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Lat.: $11^\circ 44' 11.70'' \text{ S}$, Long.: $76^\circ 15' 25.53'' \text{ W}$, Altitud: 3542 msnm.



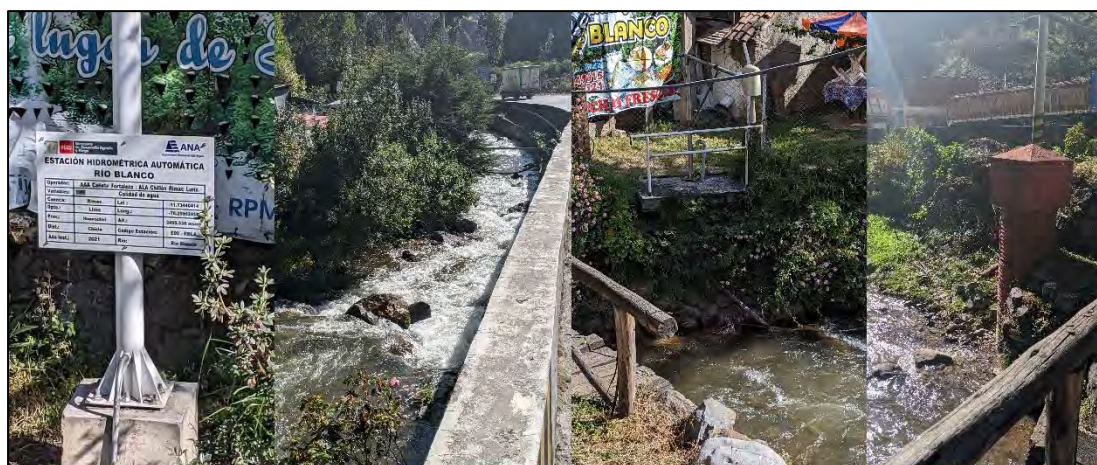
Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 16. Medición del caudal aprox. conociendo la velocidad superficial del fujo. Lat.: $11^\circ 44' 3.74'' \text{ S}$, Long.: $76^\circ 15' 34.38'' \text{ W}$, Altitud: 3527 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 17. Estación meteorológica San Mateo. Lat.: $11^{\circ} 44' 3.85''$ S, Long.: $76^{\circ} 15' 32.49''$ W, Altitud: 3500 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 18. Confluencia del río Rímac y río Blanco. Lat.: $11^{\circ} 43' 53.56''$ S, Long.: $76^{\circ} 16' 6.02''$ W, Altitud: 3480 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 19. Regla de medición de caudal en la estación meteorológica e hidrométrica San Mateo. Lat.: 11° 45' 36.25" S, Long.: 76° 18' 3.71" W, Altitud: 3185 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 20. Estación meteorológica e hidrométrica San Mateo. Lat.: 11° 45' 36.25" S, Long.: 76° 18' 3.71" W, Altitud: 3185 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 21. Relave minero Tamboraque. Lat.: 11° 47' 3.95" S, Long.: 76° 18' 33.62" W, Altitud: 2955 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 22. Confluencia del río Rímac y quebrada Parac. Lat.: 11° 47' 3.19" S, Long.: 76° 18' 33.33" W, Altitud: 2956 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.

Fotografía 23. Río Rímac a la altura de minera y estación Tamboraque. Lat.: 11° 47' 3.19" S, Long.: 76° 18' 33.33" W, Altitud: 2956 msnm.



Nota. Elaboración propia, mayo de 2022.

Fotografía 24. Toma Tamboraque. Lat.: 11° 47' 4.47" S, Long.: 76° 18' 35.56" W, Altitud: 2876 msnm.



Nota. Elaboración propia, Mayo de 2022.