

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“MODELAMIENTO DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN
CUENCAS DE LA SIERRA CENTRAL DEL PERÚ”**

**Presentada por:
SANDRA DEL AGUILA RÍOS**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR
DOCTORIS PHILOSOPHIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

Lima – Perú

2021

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“MODELAMIENTO DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN
CUENCAS DE LA SIERRA CENTRAL DEL PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR
*Doctoris Philosophiae***

Presentada por:

SANDRA DEL AGUILA RÍOS

Sustentada y aprobada ante el siguiente Jurado:

Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo

PRESIDENTE

Dr. Abel Mejía Marcacuzco

ASESOR

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva

MIEMBRO

Ph.D. Eduardo Chávarri Velarde

MIEMBRO

Dr. Julio Ordoñez Gálvez

MIEMBRO EXTERNO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia: Alberto, mi esposo; Joel y Nadira, mis hijos, por ser el motor que hace que me levante cada día.

A mis padres Oscar y María Luísa, con mucho amor.

A los buenos amigos, que de alguna manera siempre estuvieron, están y estarán a mi lado.

*“Quiero volver a tierras niñas;
llévenme a un blando país de aguas.
En grandes pastos envejezca
y haga al río fábula y fábula.
Tenga una fuente por mi madre
y en la siesta salga a buscarla,
y en jarras baje de una peña
un agua dulce, aguda y áspera”.*

Gabriela Mistral

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la posibilidad de vivir a plenitud cada día.

A mi hermano Samuel, que tuvo la paciencia de enseñarme.

A mi asesor Dr. Jesús Abel Mejía Marcacuzco, por sus acertadas sugerencias para mejorar el trabajo.

A los Doctores, Eduardo Chávarry Velarde, Absalón Vásquez Villanueva, Néstor Montalvo Arquíñigo y Julio Ordoñez Gálvez, miembros del Comité Consejero, por haberme brindado su orientación y recomendaciones para mejorar y culminar el propósito de materializar esta investigación.

Al personal administrativo del Programa de Doctorado en Recursos Hídricos en la persona de la Srta. Nilda Paco, por su amabilidad y ayuda oportuna a lo largo de mi permanencia como alumna del Programa de Doctorado en Recursos Hídricos.

A mis hijos Joel y Nadira, que me alientan a conseguir mis sueños, por ser el motivo e inspiración para no rendirme, nunca.

Finalmente, agradecer a Alberto Oviedo Sandoval, mi esposo y colega, por su apoyo incondicional en los proyectos académicos de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	4
2.2.	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	8
2.2.1.	Hidrología.....	8
2.2.2.	Cuenca hidrográfica	9
2.2.3.	La cuenca hidrológica	9
2.2.4.	Ciclo hidrológico.....	10
2.2.5.	Procesos del ciclo hidrológico.....	11
2.2.6.	Balance hidrológico.....	26
2.2.7.	Parámetros geomorfológicos de una cuenca	28
2.2.8.	Tiempo de concentración de la cuenca	43
2.2.9.	Índices de caracterización hidrológica de cuencas.....	48
2.3.	MODELOS EN HIDROLOGÍA	49
2.3.1.	Tipología de modelos matemáticos en hidrología según su clasificación estructural	51
2.3.2.	Tipología de modelos hidrológicos de acuerdo al nivel de agregación	54
2.3.3.	Razones para el modelamiento hidrológico	55
2.3.4.	Procesos dominantes a diferentes escalas	56
2.3.5.	Bondad de ajuste de modelos	57
2.4.	MODELO PRECIPITACIÓN – ESCORRENTÍA DE LUTZ SCHOLTZ.....	59
2.5.	MODELO <i>SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL</i> - SWAT	71
2.5.1.	Ventajas de utilizar el modelo SWAT.....	73
2.5.2.	Componentes del modelo SWAT.....	74
2.6.	MODELAMIENTO CLIMÁTICO	78
2.6.1.	Cambio climático	78
2.6.2.	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC .	79
2.6.3.	Modelos climáticos globales	80
2.6.4.	Escenarios de emisiones de CO ₂ del IPCC	82
2.6.5.	Simulaciones de los modelos del IPCC.....	84
2.6.6.	Métodos de <i>Downscaling</i>	84

2.7. CAMBIO CLIMÁTICO Y TENDENCIAS DEL CLIMA EN LA REGIÓN JUNÍN.....	85
2.8. BASE DE DATOS PISCO.....	86
III. MATERIALES Y METODOS	88
3.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	88
3.2. INFORMACIÓN SIG Y CARTOGRÁFICA UTILIZADA.....	89
3.3. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	92
3.4. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA	93
3.5. INFORMACIÓN PARA CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MORFOLÓGICA	94
3.6. APLICACIÓN DEL MODELO LUTZ SCHOLTZ.....	95
3.7. APLICACIÓN DEL MODELO SWAT.....	96
3.8. FORMULACIÓN DE UN MODELO HÍBRIDO: LUTZ SCHOLTZ MODIFICADO (LSM).....	113
3.9. PRONÓSTICO CLIMÁTICO AL 2100	121
3.9.1. Cálculo de proyecciones climáticas	121
3.10. MODELAMIENTO DINÁMICO ESPACIAL.....	123
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	134
4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	134
4.1.1. Características hidrográficas	135
4.1.2. Características fisiográficas y topográficas	135
4.1.3. Características geológicas	143
4.1.4. Características edafológicas	145
4.1.5. Cobertura vegetal de las cuencas de estudio	149
4.1.6. Características de los suelos según su Capacidad de Uso Mayor (CUM) ...	154
4.1.7. Características ecológicas	157
4.1.8. Características climáticas	159
4.1.9. Características socioeconómicas de la zona de estudio	161
4.2. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO.....	170
4.2.1. Parámetros de relieve	170
4.2.2. Parámetros de forma de las cuencas de estudio	175
4.2.3. Parámetros de drenaje y/o red hidrográfica.....	178
4.2.4. Parámetros de declividad de las cuencas.....	181
4.2.5. Tiempos de concentración de las cuencas de estudio	189

4.2.6. Caracterización hidrológica de las cuencas de estudio	190
4.3. APLICACIÓN DE MODELOS PRECIPITACIÓN- ESCORRENTÍA	193
4.3.1. Modelamiento hidrológico con Lutz Scholtz (LS).....	193
4.3.2. Modelamiento hidrológico con SWAT	218
4.3.3. Modelamiento hidrológico con el modelo Lutz Scholtz Modificado (LSM)	232
4.3.4. Resumen gráfico y estadístico del uso de los modelos LS, SWAT y LSM.	251
4.4. PRONÓSTICO CLIMÁTICO EN LAS CUENCAS DE ESTUDIO.....	254
4.5. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO FUTURO DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO	257
V. CONCLUSIONES	264
VI. RECOMENDACIONES	266
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	267
VIII. ANEXOS	288

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de K_1 , K_2 y K_3 de la fórmula de Nadal para estimación de C.....	13
Tabla 2: Coeficientes de escorrentía según Prevert (%).....	13
Tabla 3: Coeficientes de escorrentía según Molchanov (%).....	14
Tabla 4: Grupos hidrológicos de suelos	19
Tabla 5: Curva Número (CN) de escorrentía para diferentes usos de la tierra.....	20
Tabla 6: Curva Número (CN) de escorrentía para áreas urbanas	21
Tabla 7: Curva Número (CN) de escorrentía para áreas forestales ⁽¹⁾	22
Tabla 8: Curva Número (CN) de escorrentía para zonas de montañas áridas y semiáridas ⁽¹⁾	23
Tabla 9: Clasificación de la humedad antecedente en una cuenca	23
Tabla 10: Conversión del número de curva de la condición II a las condiciones I y III.....	24
Tabla 11: Clasificación de las cuencas según su tamaño	29
Tabla 12: Descripción de la cuenca según su coeficiente de masividad	30
Tabla 13: Forma de la cuenca según el índice de compacidad o de Gravelius (K_c).....	34
Tabla 14: Forma de las cuencas según el factor de forma resultante (K_f).....	35
Tabla 15: Forma de las cuencas según la relación de Horton (R_f)	36
Tabla 16: Valores interpretativos de la densidad de drenaje (D_d)	40
Tabla 17: Tipos de terrenos según su pendiente.....	42
Tabla 18: Tipos de pendiente media del cauce principal.....	43
Tabla 19: Índices hidrológicos de importancia a escala de cuenca	49
Tabla 20: Características de los modelos según su clasificación estructural	53
Tabla 21: Criterios de rendimiento de modelos hidrológicos	59
Tabla 22: Ecuaciones empíricas para el cálculo de C en la región Junín	62
Tabla 23: Precipitación efectiva (PE) según el Bureau of Reclamation.....	64
Tabla 24: Límite superior para la precipitación efectiva.....	65
Tabla 25: Coeficientes para el cálculo de la precipitación efectiva	65
Tabla 26: Lámina acumulada según tipo de aporte dentro de la cuenca (mm/año)	66
Tabla 27: Almacenamiento hídrico durante la época de lluvias (%).....	69
Tabla 28: Tendencia de forzamiento radiativo bajo diferentes RCP.....	83
Tabla 29: Rango de coordenadas geográficas y UTM de las cuencas.....	89
Tabla 30: Fuentes de información cartográfica utilizada en la investigación	90

Tabla 31: Ubicación (UTM) y tipo de estaciones utilizadas en el estudio	92
Tabla 32: Uso actual de los suelos en la cuenca del río Anya y Mchique- código SWAT	101
Tabla 33: Atributos requeridos de SWAT para los suelos	104
Tabla 34: Datos de entrada de los suelos de la cuenca Anya	105
Tabla 35: Datos de entrada de los suelos de la cuenca Mchique.....	106
Tabla 36: Clases de pendiente en porcentaje para ingresarse al SWAT	107
Tabla 37: Precipitación total en los 5 días anteriores	117
Tabla 38: Cálculo de la variación de precipitación y temperaturas.....	122
Tabla 39: Puntos de generación de datos con PISCO	123
Tabla 40: Códigos de asignación de cobertura ambas cuencas	124
Tabla 41: Permanencias y transiciones de cobertura en la cuenca Anya	126
Tabla 42: Permanencias y transiciones de cobertura en la cuenca Mchique.....	130
Tabla 43: Características fisiográficas de la cuenca Anya	141
Tabla 44: Características fisiográficas de la cuenca Mchique.....	141
Tabla 45: Resumen de las características edáficas de los suelos de la cuenca Anya	147
Tabla 46: Resumen de las características edáficas de los suelos de la cuenca Mchique	147
Tabla 47: Tasa de cambio de cobertura vegetal, cuenca Anya (2010 – 2019).....	151
Tabla 48: Tasa de cambio de cobertura vegetal, cuenca Mchique (2010 – 2019)	151
Tabla 49: Descripción de símbolos – CUM - característicos de la zona de estudio.....	154
Tabla 50: Descriptivo de la Capacidad de Uso Mayor (CUM) de la cuenca Anya.....	155
Tabla 51: Descriptivo de la Capacidad de Uso Mayor (CUM) de la cuenca Mchique	155
Tabla 52: Porcentaje correspondiente a cada zona de vida - cuenca Anya	159
Tabla 53: Porcentaje correspondiente a cada zona de vida - cuenca Mchique.....	159
Tabla 54: Tasa de crecimiento poblacional en la zona de estudio.....	161
Tabla 55: Condición de pobreza en la zona de estudio	163
Tabla 56: Áreas acumuladas por debajo y por encima de las cotas – Cuenca Anya.....	171
Tabla 57: Áreas acumuladas por debajo y por encima de las cotas – Cuenca Mchique ...	172
Tabla 58: Variables de cálculo de altura media - cuenca Anya.....	174
Tabla 59: Variables de cálculo de la altura media de la cuenca Mchique.....	175
Tabla 60: Variables de cálculo del rectángulo equivalente en la cuenca Anya.....	177
Tabla 61: Variables de cálculo del rectángulo equivalente en la cuenca Mchique	177
Tabla 62: Relación de bifurcación en la cuenca Anya	179

Tabla 63: Relación de bifurcación en la cuenca Mchique.....	180
Tabla 64: Cantidad de corrientes según orden en la cuenca Anya	180
Tabla 65: Cantidad de corrientes según su orden en la cuenca Mchique	180
Tabla 66: Variables de cálculo de la pendiente media en la cuenca Anya por Alvord	182
Tabla 67: Variables de cálculo de la pendiente media en la cuenca Mchique por Alvord	183
Tabla 68: Progresiva, cota, desnivel y pendiente por tramos del río Anya	184
Tabla 69: Progresiva, cota, desnivel y pendiente por tramos del río Mchique.....	185
Tabla 70: Valores parciales de cálculo del índice de pendiente - Cuenca Anya.....	187
Tabla 71: Valores parciales de cálculo del índice de pendiente – Cuenca Mchique.....	188
Tabla 72: Resumen de parámetros geomorfológicos de las cuencas Anya y Mchique.....	188
Tabla 73: Resultados del cálculo del tiempo de concentración para ambas cuencas	189
Tabla 74: Índices hidrometeorológicos de las cuencas de estudio	191
Tabla 75: Precipitación mensual (mm) estaciones del SENAMHI – año 2014	193
Tabla 76: Precipitación promedio anual (mm) - cuenca Anya.....	195
Tabla 77: Precipitación promedio anual (mm) - cuenca Mchique	196
Tabla 78: Consolidado mensual de datos de T (°C) y ETo (mm) – año 2014	197
Tabla 79: Estimación de la ET ₀ – Fórmula de Hargreaves, cuenca Anya.....	198
Tabla 80: Estimación de la ET ₀ – Fórmula de Hargreaves, cuenca Mchique	199
Tabla 81: Estimación de la ET ₀ en las cuencas de estudio– Fórmula de Penman.....	201
Tabla 82: Consolidado ET ₀ (mm/mes) - cuenca Anya.....	202
Tabla 83: Consolidado ET ₀ (mm/mes) - cuenca Mchique	202
Tabla 84: Estimación del coeficiente de escorrentía anual de las cuencas de estudio	204
Tabla 85: Características generales de las cuencas Anya y Mchique - Modelo Lutz Scholtz.....	206
Tabla 86: Parámetros del modelo Lutz Scholtz calculados para las cuencas Anya y Mchique	207
Tabla 87: Almacenamiento hídrico durante la época de lluvias en la región Junín	208
Tabla 88: Simulación de caudales mensuales río Anya - modelo Lutz Scholtz (C _e = 0.47).....	209
Tabla 89: Simulación de caudales mensuales río Anya - modelo Lutz Scholtz (C _e = 0.52).....	209
Tabla 90: Simulación de caudales mensuales, río Mchique - modelo Lutz Scholtz (C _e = 0.45).....	211

Tabla 91: Simulación de caudales mensuales, río Mchique - modelo Lutz Scholtz ($C_e = 0.44$).....	211
Tabla 92: Escurrimientos y caudales simulados vs observados - cuenca Anya ($C_e = 0.47$).....	212
Tabla 93: Escurrimientos y caudales simulados vs observados - cuenca Anya ($C_e = 0.52$).....	213
Tabla 94: Indicadores de bondad de ajuste, modelo Lutz Scholtz- cuenca Anya	213
Tabla 95: Parámetros de generación de escurrimientos para períodos extendidos	215
Tabla 96: Estadísticas de la regresión – simulación con $C_e = 0.47$	215
Tabla 97: Escurrimientos y caudales simulados vs observados - cuenca Mchique ($C_e = 0.45$).....	216
Tabla 98: Escurrimientos y caudales simulados vs observados - cuenca Mchique ($C_e = 0.44$).....	216
Tabla 99: Indicadores de bondad de ajuste del modelo Lutz Scholtz- cuenca Mchique	217
Tabla 100: Parámetros de simulación del programa SWAT – cuenca Anya	221
Tabla 101: Bondad de ajuste estadístico a nivel diario modelo SWAT – cuenca Anya ...	224
Tabla 102: Caudales (m^3/s) simulados con SWAT vs observados (mensuales) - cuenca Anya.....	225
Tabla 103: Indicadores de bondad de ajuste del modelo SWAT mensual - cuenca Anya.....	225
Tabla 104: Balance hídrico de la cuenca Anya (resultados de la simulación 15)	226
Tabla 105: Parámetros de simulación del programa SWAT – cuenca Mchique.....	227
Tabla 106: Bondad de ajuste estadístico a nivel diario modelo SWAT – cuenca Mchique	229
Tabla 107: Caudales simulados con SWAT vs observados (mensuales) - cuenca Mchique	230
Tabla 108: Indicadores de bondad de ajuste del modelo SWAT mensualizado - cuenca Mchique	231
Tabla 109: Balance hídrico de la cuenca Mchique (resultados de la simulación 6).....	231
Tabla 110: Asignación de Curva Número según cobertura vegetal en Anya y Mchique	233
Tabla 111: Atributos tabulares de ArcGIS, cuenca Anya- cálculo de CN ponderada.....	234

Tabla 112: Atributos tabulares de Arc Gis, cuenca Mchique - cálculo de CN ponderada.....	236
Tabla 113: Humedad promedio mensual de las cuencas Anya y Mchique	238
Tabla 114: Condición antecedente de humedad mensual en las cuencas de estudio	239
Tabla 115: Características generales de las cuencas Anya y Mchique- modelo LSM.....	243
Tabla 116: Abstracciones máximas e iniciales según CN ambas cuencas	244
Tabla 117: Simulación de caudales mensuales, río Anya - modelo Lutz Scholtz Modificado.....	244
Tabla 118: Cálculo de errores (Q_{sim} vs. Q_{obs}) - cuenca Anya.....	245
Tabla 119: Almacenamiento hídrico durante la época de lluvias en las cuencas Anya y Mchique	245
Tabla 120: Bondad de ajuste del modelo Lutz Scholtz Modificado – cuenca Anya.....	246
Tabla 121: Parámetros de generación de escurrimientos para períodos extendidos con LSM.....	247
Tabla 122: Estadísticos de la regresión modelo LSM – Cuenca Anya	247
Tabla 123: Promedio de 10 series generadas (mm), modelos LS y LSM- cuenca Anya.....	248
Tabla 124: Simulación caudales mensuales, río Mchique - modelo L. Scholtz Modificado.....	249
Tabla 125: Cálculo de errores (Q_{sim} vs. Q_{obs}) - cuenca Mchique	250
Tabla 126: Indicadores de bondad de ajuste del modelo – cuenca Mchique	250
Tabla 127: Resumen de estadísticos obtenidos con los modelos (Q en mm)- Anya.....	252
Tabla 128: Resumen de estadísticos obtenidos con los modelos (Q en mm)- Mchique ...	253
Tabla 129: Resumen de indicadores de bondad de ajuste a escala mensual	253
Tabla 130: Modelos MCG (CMIP5), país de origen y resolución atmosférica.....	255
Tabla 131: Variación de la precipitación y la temperatura mensual en la zona de estudio con modelos MCG al 2100 – RCP 4.5.....	255
Tabla 132: Valores promedio de variación de 05 modelos CMIP5 escenario RCP 4.5....	256
Tabla 133: Variación de la precipitación y la temperatura en la zona de estudio con modelos MCG al 2100 – RCP 8.5	256
Tabla 134: Valores promedio de variación de 05 modelos CMIP5 escenario RCP 8.5....	257
Tabla 135: Caudales simulados (m^3/s) con SWAT, 05 modelos CMIP5- RCP 4.5- cuenca Anya.....	258

Tabla 136: Caudales simulados (m ³ /s) con SWAT, 05 modelos CMIP5 - RCP 8.5- cuenca Anya.....	259
Tabla 137: Caudales simulados (m ³ /s) con SWAT, 05 modelos CMIP5- RCP 4.5- cuenca Mchique	261
Tabla 138: Caudales simulados (m ³ /s) con SWAT, 05 modelos CMIP5- RCP 8.5- cuenca Mchique	262
Tabla 139: Tabla resumen de modelamiento hidrológico en SWAT con MCG	263
Tabla 140: Análisis de suelos – cuenca Anya	294
Tabla 141: Análisis de suelos – cuenca Mchique.....	294

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Formulación de la Curva Número.....	16
Figura 2: Gráfico original con las curvas numeradas	18
Figura 3: Diagrama triangular para determinación de la textura (clasificación USDA).....	19
Figura 4: Altitud mediana de una cuenca	31
Figura 5: Curva hipsométrica según la edad del río	32
Figura 6: Orden de los ríos según esquema de Horton- Ejemplo río de orden 4.....	39
Figura 7: Esquema de análisis de cálculo de la pendiente media de una cuenca según Alvord	41
Figura 8: Esquema conceptual de modelos matemáticos en hidrología.....	51
Figura 9: Porción de precipitación efectiva.....	65
Figura 10: Representación esquemática del ciclo hidrológico	72
Figura 11: Contribución del IPCC a la ciencia climática y la formulación de políticas	80
Figura 12: Esquema de un Modelo Climático Global	81
Figura 13: Emisiones de combustibles fósiles en los escenarios RCP	83
Figura 14: Ubicación política de las microcuencas Anya y Mchique	88
Figura 15: Imagen satelital de las cuencas de estudio	89
Figura 16: Estaciones meteorológicas, pluviométricas e hidrométricas de la zona de estudio.....	93
Figura 17: Datos de entrada para la simulación de procesos con SWAT.....	98
Figura 18: Imagen satelital, ríos (ANA) y corrientes generadas en SWAT en la cuenca Anya.....	99
Figura 19: 8 subcuencas generadas por SWAT en la cuenca Anya hasta el punto de aforo.....	100
Figura 20: 11 Subcuencas generadas por SWAT en la cuenca Mchique	100
Figura 21: Uso de Suelos de la cuenca Anya reclasificados con código SWAT	101
Figura 22: Uso de Suelos de la cuenca Mchique reclasificados con código SWAT.....	102
Figura 23: Suelos de la cuenca Anya actualizado al 2019	102
Figura 24: Suelos de la cuenca Mchique actualizado al 2019.....	103
Figura 25: Ejemplo de edición de suelos correspondiente al área urbana (AU) de Anya.	104
Figura 26: Pendientes de la cuenca Anya generados por SWAT	107
Figura 27: Pendientes de la cuenca Mchique generados por SWAT	108

Figura 28: 147 HRU´s en la cuenca Anya generados por SWAT.....	108
Figura 29: 116 HRU´s de la cuenca Mchique generados por SWAT	109
Figura 30: Esquema del Modelo Lutz Scholtz Modificado.....	114
Figura 31: Componentes del Balance Hídrico – Estación seca del año	115
Figura 32: Componentes del Balance Hídrico – Estación lluviosa del año	115
Figura 33: Portal de descargas del Climate Explorer	121
Figura 34: Delimitación del área de estudio en Climate Explorer	122
Figura 35: Mapas de cobertura vegetal 2010 (izq.) y 2019 (der.) cuenca Anya	125
Figura 36: Mapa de tabulación cruzada entre 2010 y 2019.....	126
Figura 37: Ganancias y pérdidas de terreno (km ²) cuenca Anya- Salida TerrSet.....	126
Figura 38: Cambio neto (km ²) cuenca Anya entre 2010 y 2019- Salida TerrSet.....	127
Figura 39: Mapa de cambios cuenca Anya entre 2010 y 2019- Salida TerrSet	127
Figura 40: Mapa de persistencias entre 2010 y 2019 cuenca Anya – Salida TerrSet.....	127
Figura 41: Coeficiente de Cramer para identificación de variables	128
Figura 42: Mapa proyectado del cambio de cobertura en la cuenca Anya (2030)	128
Figura 43: Mapas de cobertura vegetal 2010 (izq.) y 2019 (der.) cuenca Mchique.....	129
Figura 44: Mapa de tabulación cruzada (Izq - sin corregir; Der- corregida).....	130
Figura 45: Ganancias y pérdidas de terreno (km ²) cuenca Mchique- Salida TerrSet.....	131
Figura 46: Cambio neto (km ²) cuenca Mchique entre 2010 y 2019- Salida TerrSet	131
Figura 47: Mapa de cambios cuenca Mchique entre 2010 y 2019- Salida TerrSet.....	131
Figura 48: Coeficiente de Cramer para identificación de variables	132
Figura 49: Mapa proyectado del cambio de cobertura (2030) - cuenca Mchique.....	133
Figura 50: Imágenes comparativas en diferentes años A) 2015 y B) 2018, cuenca Any.....	134
Figura 51: Imágenes comparativas en diferentes años A) 2015 y B) 2018, cuenca Mchique	135
Figura 52: Red hidrográfica de la zona de estudio	137
Figura 53: Mapa topográfico de la zona de estudio.....	138
Figura 54: Mapa fisiográfico de la zona de estudio.....	142
Figura 55: Mapa geológico de la zona de estudio	146
Figura 56: Mapa edafológico de la zona de estudio	148
Figura 57: Mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio elaborado en base a la ZEE (imágenes Landsat 2010).....	152
Figura 58: Mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio actualizado con imagen	

del satélite PlanetScope 2019	153
Figura 59: Capacidad de Uso Mayor de los suelos de la zona de estudio.....	156
Figura 60: Diagrama Bioclimático del sistema Holdridge	157
Figura 61: Zonas de vida de la zona de estudio.....	160
Figura 62: Mapa de los distritos correspondientes a las cuencas Anya y Mchique	168
Figura 63: Mapa de vulnerabilidad socioeconómica de las cuencas de estudio.....	169
Figura 64: Curva hipsométrica de la cuenca del río Anya	171
Figura 65: Curva hipsométrica de la cuenca del río Mchique.....	172
Figura 66: Histograma de frecuencia de altitudes de la cuenca Anya.....	173
Figura 67: Histograma de frecuencia de altitudes de la cuenca Mchique	174
Figura 68: Orden de los ríos en la cuenca Anya.....	178
Figura 69: Orden de los ríos en la cuenca Mchique	179
Figura 70: Perfil longitudinal del río Anya	184
Figura 71: Perfil longitudinal del río Mchique.....	186
Figura 72: Curva de duración de la cuenca Anya (Salida HidroEsta).....	192
Figura 73: Curva de duración de la cuenca Mchique (Salida HidroEsta)	192
Figura 74: Pluviograma mensual estaciones del SENAMHI – año 2014.....	194
Figura 75: Correlación Prec. Obs. y Prec. PISCO – Anya (2013-2015).....	195
Figura 76: Correlación Prec. Obs. y Prec. PISCO – Mchique (2014-2016).....	196
Figura 77: Mapa de temperatura promedio anual (medidas in situ) – año 2014.....	197
Figura 78: Salida del programa CROPWAT – cálculo de ET_0 – cuenca Anya.....	200
Figura 79: Salida del programa CROPWAT – cálculo de ET_0 – cuenca Mchique.....	201
Figura 80: Gráfico de ET_0 mensual – cuenca Anya	202
Figura 81: Gráfico de ET_0 mensual–cuenca Mchique.....	202
Figura 82: Áreas de esorrentía hasta los puntos de aforo de las cuencas de estudio (E: 1/100 000).....	206
Figura 83: Hidrograma de caudales simulados vs observados, modelo LS – cuenca Anyá ($C_e= 0.47$).....	214
Figura 84: Hidrograma de caudales simulados vs observados, modelo LS – cuenca Anyá ($C_e= 0.52$).....	214
Figura 85: Hidrograma de caudales sim vs obs, modelo LS – cuenca Mchique ($C_e= 0.44$).....	218
Figura 86: Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio	219
Figura 87: Delimitación de la cuenca Anya (izq. Hasta el río Mantaro, der. Hasta	

punto de aforo).....	219
Figura 88: Delimitación de la cuenca Mchique (izq. Hasta el río Mantaro, der. Hasta punto de aforo).....	220
Figura 89: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m ³ /s), cuenca Anya (Salida 05).....	222
Figura 90: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m ³ /s), cuenca Anya (Salida 07).....	223
Figura 91: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m ³ /s), cuenca Anya (Salida 15).....	223
Figura 92: Resultados de las variables simuladas (Salida 15) – cuenca Anya.....	227
Figura 93: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m ³ /s), cuenca Mchique (Salida 2).....	228
Figura 94: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m ³ /s), cuenca Mchique (Salida 5).....	228
Figura 95: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m ³ /s), cuenca Mchique (Salida 6).....	229
Figura 96: Resultado de las variables simuladas (Salida 6)- cuenca Mchique.....	232
Figura 97: Tabla de atributos de resultado de CN Grid en el Hec Geo Hms	233
Figura 98: Mapa de CN de la cuenca Anya generado con Hec Geo Hms y Arc Gis (CN _{pond.} =76).....	235
Figura 99: Mapa de CN de la cuenca Anya generado con Hec Geo Hms y Arc Gis (CN _{pond.} =79)	236
Figura 100: Curva de recesión de la cuenca Anya utilizada en el cálculo de “a”	241
Figura 101: Curva de recesión de la cuenca Mchique utilizada en el cálculo de “a”.....	242
Figura 102: Hidrograma de Q _{obs} y Q _{sim} con el modelo Lutz Scholtz Modificado - Anya	246
Figura 103: Histograma comparativo de modelos LS, LSM y Obs. - cuenca Anya	248
Figura 104: Histograma de Q _{sim} y Q _{obs} con el modelo Lutz Scholtz Modificado – Mchique.....	251
Figura 105: Diagrama de caja para los caudales observados (mm) - cuenca Anya	251
Figura 106: Diagrama de cajas de modelos: LSM, SWAT y LS (arriba - abajo) - Anya	252
Figura 107: Diagrama de caja para los caudales observados (mm) - cuenca Mchique.....	252
Figura 108: Diagrama de cajas de modelos: LSM, SWAT y LS (arriba - abajo) -	

Mchique.....	253
Figura 109: Hidrogramas de simulación con SWAT (RCP 4.5) cuenca Anya	258
Figura 110: Hidrogramas de simulación con SWAT (RCP 8.5) cuenca Anya	260
Figura 111: Hidrogramas de simulación con SWAT (RCP 4.5) cuenca Mchique.....	261
Figura 112: Hidrogramas de simulación con SWAT (RCP 8.5) cuenca Mchique.....	262
Figura 113: Cobertura vegetal – cultivos de maíz en la zona baja adyacente al río Anyá.	288
Figura 114: Cobertura vegetal de la cuenca Anya – cultivos de papa y árboles de eucaliptos en las partes más altas de la cuenca. Al fondo, parte del “divortium aquarium”, suelo con características arcillosas.	289
Figura 115: Mira limnimétrica del río Anya. Nótese el tipo de flujo subcrítico del río....	289
Figura 116: Río Anya aguas debajo de la estación limnimétrica.	290
Figura 117: Cobertura vegetal de la cuenca Anya – cultivos de maíz, árboles de eucaliptos en zonas forestadas, trochas carrozables y viviendas de material noble dentro de la cuenca.	290
Figura 118: Mira limnimétrica ubicada en el río Mchique.....	291
Figura 119: Cobertura vegetal de la cuenca Mchique.	291
Figura 120: Infraestructura existente en la cuenca Mchique.	292
Figura 121: Cobertura vegetal de la cuenca Mchique en la zona baja.	292
Figura 122: Cobertura vegetal de cultivo de maíz en la cuenca Mchique.....	293
Figura 123: Salida de SPAW donde $K_{prom} = 10.47$ mm/h (cuenca Anya)	295
Figura 124: Salida de SPAW donde $K_{prom} = 24.44$ mm/h (cuenca Mchique).....	295
Figura 125: Mapa de precipitación mensual - enero 2014	296
Figura 126: Mapa de precipitación mensual - febrero 2014.....	296
Figura 127: Mapa de precipitación mensual - marzo 2014	297
Figura 128: Mapa de precipitación mensual - abril 2014.....	297
Figura 129: Mapa de precipitación mensual - mayo 2014	298
Figura 130: Mapa de precipitación mensual - junio 2014.....	298
Figura 131: Mapa de precipitación mensual - julio 2014.....	299
Figura 132: Mapa de precipitación mensual - agosto 2014.....	299
Figura 133: Mapa de precipitación mensual - setiembre 2014.....	300
Figura 134: Mapa de precipitación mensual – octubre 2014	300
Figura 135: Mapa de precipitación mensual - noviembre 2014	301
Figura 136: Mapa de precipitación mensual – diciembre2014	301

Figura 137: Serie temporal de la humedad del suelo de la cuenca Anya	311
Figura 138: Serie temporal de la humedad del suelo de la cuenca Mchique	311
Figura 139: Factura electrónica – compra de la imagen satelital	312
Figura 140: Mapas de servicio de agua de las cuencas Anya y Mchique	315
Figura 141: Mapa de servicio de alcantarillado - cuencas Anya y Mchique.....	315
Figura 142: Mapa de servicio de electricidad - cuencas Anya y Mchique.....	316
Figura 143: Ubicación de las Postas de Salud de las cuencas Anya y Mchique	316
Figura 144: Ubicación de las Instituciones Educativas de las cuencas Anya y Mchique.....	317
Figura 145: Trazado de las vías de las cuencas Anya y Mchique	317

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Panel fotográfico.....	288
Anexo 2: Datos de suelos – zona de estudio	294
Anexo 3: Mapas de isoyetas mensuales – año 2014.....	296
Anexo 4: Cálculo de coeficiente de agotamiento	302
Anexo 5: Cálculo de coeficiente de agotamiento	306
Anexo 6: Series generadas con el modelo Lutz Scholtz- cuenca Anya.....	309
Anexo 7: Series generadas con el modelo Lutz Scholtz Modificado – cuenca Anya	310
Anexo 8: Variación temporal de humedad del suelo.....	311
Anexo 9: Factura de compra de imagen satelital.....	312
Anexo 10: Modelo de vulnerabilidad socioeconómica (VSCE) de las cuencas Anya y Mchique	313

RESUMEN

El modelamiento hidrológico de las cuencas es importante para la gestión del recurso hídrico; en ese sentido, las cuencas de la sierra central del Perú ubicadas en zonas de cabecera son relevantes. El objetivo general de esta investigación fue modelar los procesos hidrológicos en las cuencas Anya y Mchique, pertenecientes a la cuenca del río Mantaro, Junín. Se utilizó dos modelos para la generación de escorrentía; el modelo empírico mensual Lutz Scholtz (LS) y el modelo semidistribuido diario SWAT. En base a la ecuación de balance hídrico y desempeño de ambos modelos, se planteó una modificación al modelo Lutz Scholtz para el cálculo de la Precipitación Efectiva mensual, utilizándose la metodología de la Curva Número con herramientas de los programas ArGis y HecGeoHms 10.4. El modelo Lutz Sholtz Modificado (LSM) permitió involucrar las características del suelo y cobertura vegetal en la generación de escorrentía a partir de precipitación y por ende mejorar el entendimiento físico del proceso. La bondad de ajuste de los modelos fue analizada mensualmente por métodos gráficos y estadísticos. En Anya, los indicadores de desempeño fueron buenos con los tres modelos probados, verificándose que los estadísticos mejoraron con los modelos SWAT y LSM; en Mchique se obtuvo un 66.7% de indicadores aprobatorios en todos los modelos probados. Asimismo, se estudió el efecto espacio temporal del cambio climático en el escurrimiento de las cuencas a través de cinco modelos climáticos globales (Acces, bcc_csm1, BNU_ESM, CMCC_CM y GISS_E2) y dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y 8.5). La simulación se realizó con SWAT para el período 2070-2100. Los resultados sugieren que habría un incremento de caudales en comparación con el período base 1980-2010 en ambas cuencas; en promedio el caudal en Anya aumentaría en 29.4% y 34.1% y en Mchique 5.4% y 10.8% en RCP 4.5 y 8.5 respectivamente.

Palabras clave: Modelamiento hidrológico, SWAT, Lutz Scholtz, PISCO, cambio climático, MCG.

ABSTRACT

The hydrological modeling of basins is important for the management of water resources; In this sense, the basins of the central highlands of Peru located in headwaters are relevant. The general objective of this research was to model the hydrological processes in the Anya and Mchique basins, belonging to the Mantaro river basin, Junín. Two models were used for the generation of runoff; the Lutz Scholtz (LS) monthly empirical model and the SWAT daily semi-distributed model. Based on the equation of water balance and performance of both models, a modification to the Lutz Scholtz model was proposed to calculate the monthly Effective Precipitation, using the Curve Number methodology with tools from the ArGis and HecGeoHms 10.4 programs. The Modified Lutz Sholtz model (LSM) allowed to involve the characteristics of the soil and vegetation cover in the generation of runoff from precipitation and therefore improve the physical understanding of the process. The goodness of fit of the models was analyzed monthly by graphic and statistical methods. In Anya, the performance indicators were good with the three models tested, verifying that the statistics improved with the SWAT and LSM models; In Mchique, 66.7% of passing indicators were obtained in all the models tested. Likewise, the space-time effect of climate change on watershed runoff was studied through five global climate models (Acces, bcc_csm1, BNU_ESM, CMCC_CM and GISS_E2) and two emission scenarios (RCP 4.5 and 8.5). The simulation was carried out with SWAT for the period 2070-2100. The results suggest that there would be an increase in flows compared to the base period 1980-2010 in both basins; on average the flow in Anya would increase by 29.4% and 34.1% and in Mchique 5.4% and 10.8% in RCP 4.5 and 8.5 respectively.

Keywords: Hydrological modeling, SWAT, Lutz Scholtz, PISCO, climate change, CGM.

I. INTRODUCCIÓN

La presente investigación comprendió el estudio del comportamiento hidrológico de dos cuencas altoandinas ubicadas en la región Junín perteneciente a la sierra central del Perú: la cuenca del río Anya, ubicada en la cordillera central y la cuenca del río Mchique en el flanco occidental de los Andes; previamente se describieron a detalle las cuencas a través de la delimitación y cálculo de sus parámetros geomorfológicos, tiempo de concentración y caracterización climática con el uso de datos meteorológicos del proyecto VLIR y de la base de datos PISCO del SENAMHI, para luego aplicar modelos hidrológicos, con la finalidad de simular el comportamiento de la escorrentía transformándola a caudal.

Se sabe que las cuencas brindan al ser humano múltiples servicios, entre los que se destacan los ambientales, incluyendo los hidrológicos, cuya característica de cantidad y calidad dependen del clima y del estado de conservación en el que se encuentran. En este contexto, los ecosistemas alto andinos tienen un rol protagónico para sostener la forma de vida de miles de personas (Buytaert *et al.* 2012), lo que garantiza la regulación hídrica, a través del almacenamiento de agua en los suelos, que posteriormente alimentan a riachuelos y ríos, siendo la razón principal de su estudio.

Las cuencas de la región Junín son importantes pues sus escurrimientos contribuyen a las descargas del río Mantaro, el cual permite el 35% de la generación del servicio eléctrico del Perú, siendo uno de los ríos más estudiados del país. Asimismo, la producción agrícola de la región abastece una gran cantidad de suministros alimenticios a los habitantes de la ciudad de Lima. Es decir, el aprovechamiento hídrico del río Mantaro se desarrolla para fines agrícolas, poblacionales, mineros, industriales y de producción energética, viéndose sometidos a fuertes presiones hídricas a medida que aumenta las demandas de la población (Córdova 2015; Arroyo *et al.* 2013).

Los modelos hidrológicos han sido ampliamente usados en hidrología, siendo una herramienta útil para el entendimiento de los procesos relacionados con los recursos hídricos, su cuantificación, estimación de impactos producto de los efectos del clima y, por ejemplo, estimación de los efectos por cambio de uso de suelo. Conocer e identificar los procesos predominantes en las cuencas permite desarrollar herramientas para la gestión y planificación de los recursos hídricos con el objetivo de predecir el comportamiento hidrológico de una cuenca ante diferentes escenarios climáticos para formular planes de respuesta ante escenarios desfavorables (Zúñiga *et al.* 2012). Los modelos hidrológicos buscan capturar los mecanismos físicos de generación de la escorrentía superficial y la recarga a los acuíferos subterráneos a partir de la precipitación y la evapotranspiración (Ocampo & Vélez 2013).

El modelo hidrológico de Lutz Scholtz es un modelo desarrollado para las características de las regiones altoandinas del Perú: Cajamarca, Junín, Huancavelica y Cuzco, y brinda la posibilidad de estimar el escurrimiento mensual con fines de planificación del recurso hídrico, análisis de balance hídrico para proyectos de riego, entre otros usos (Ticona 2013; Terán, 2014 & Najarro 2015). El modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT por sus siglas en inglés) es un modelo semidistribuido que es capaz de simular el comportamiento del caudal a escala diaria y su principal ventaja es que fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo de suelos en la producción de agua, sedimentos y sustancias agrícolas en diferentes condiciones (Gomariz 2018; Uribe 2010).

Adicionalmente, modelar el comportamiento hidrológico en cuencas hidrográficas presenta muchos desafíos debido a las incertidumbres del cambio climático; en este sentido, los modelos hidrológicos y climáticos proporcionan un marco para examinar la relación entre el clima y los recursos hídricos (Montecelos 2018). Analizar, comprender y proyectar los cambios en los recursos hídricos futuros resultantes de las variaciones climáticas, ayudará a desarrollar estrategias de gestión eficaces para una cuenca (Ashu & Lee 2019), por lo que, resulta importante determinar los efectos del clima futuro en el área de estudio. El impacto del cambio climático se evalúa utilizando modelos climáticos globales (MCG), probándose diferentes escenarios de emisión (por ejemplo, RCP 4.5 y RCP 8.5), luego, las descargas diarias pueden ser simuladas con las herramientas disponibles del modelo SWAT.

Por tanto, el objetivo general de la presente investigación fue modelar los procesos hidrológicos en las cuencas de los ríos Anya y Mchique pertenecientes a la cuenca del río Mantaro, Junín.

Asimismo, los objetivos específicos fueron:

- Caracterizar geomorfológica y socioeconómicamente a las cuencas de los ríos Anya y Mchique pertenecientes a la cuenca del río Mantaro de la sierra central del Perú, región Junín.
- Aplicar los modelos hidrológicos de Lutz Scholtz y SWAT para explicar la generación de escorrentía a partir de la lluvia caída en las cuencas Anya y Mchique.
- Evaluar del impacto del cambio climático en la precipitación y temperatura a través de modelos climáticos globales (MCG) en dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5) al año 2100 y simular las descargas futuras de los ríos Anya y Mchique con el modelo SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En el Perú, Najarro (2015) realizó la calibración del modelo hidrológico Lutz Scholtz y generó caudales extendidos en la cuenca del río Chacco en la región Ayacucho – Perú, perteneciente a la Unidad Hidrográfica de la Cuenca Mantaro y Autoridad Administrativa Mantaro. Se calibraron los parámetros del modelo donde previamente se determinaron las propiedades morfométricas de la cuenca y se caracterizó la red hídrica. Se utilizaron los registros de las precipitaciones promedio mensuales de 20 estaciones pertenecientes a la cuenca, completándose los datos con modelos autorregresivos, utilizándose también, los registros hidrométricos obtenidos de la estación Puente Chacco.

Terán (2014) determinó el volumen de agua aprovechable en la microcuenca del río “Tres Ríos” en Cajamarca - Perú usando el modelo determinístico estocástico Lutz Scholtz validado para los años hidrológicos 2008-2012. Se utilizó la data de la estación hidrométrica Ronquillo ubicada en el río San Lucas, la cual abastece de agua potable a una parte de la población cajamarquina, obteniéndose un ajuste del modelo de 99.6%.

Llauca (2014) realizó el balance hídrico superficial de las cuencas del Anya y Mchique mediante modelos hidrológicos como el HEC-HMS y el MODSIM en su tesis denominada: “Estudio Hídrico Superficial de las Cuencas del Anya y del Mchique, departamento de Junín, Perú”, donde la oferta hídrica fue evaluada in situ a través de los registros meteorológicos e hidrométricos de las estaciones instaladas en ambas cuencas y se estimaron las demandas para diversos usos, entre ellos el uso agrícola, pecuario, poblacional y ecológico.

Camones (2015) desarrolló la tesis titulada: “Influencia de la humedad del suelo en la relación precipitación-escorrentia en las cuencas del Anya y Mchique, Junín-Perú” en la cual se monitoreó la humedad en ambas cuencas en el año hidrológico (época de lluvias y época

de estiaje). También, se usaron los modelos Hec-HMS (*Soil Moisture Accounting*) y R.S Minerve (HBV) con el objetivo de simular la humedad del suelo y generar caudales, para luego calibrarlos y validarlos a nivel diario.

Ticona (2013) desarrolló la tesis denominada: “Implementación de Redes Neuronales Artificiales (RNA) en el Modelo de Generación de Caudales de Scholtz aplicado en Cuencas Hidrográficas del Perú”, donde se tomó como referencia cuatro cuencas con datos hidrométricos y pluviométricos, dos ubicadas en el altiplano sur, una en la selva sur y otra en la costa norte. Los resultados indican que la aplicación de las RNA mejora los caudales en época húmeda en cuencas con precipitaciones totales mensuales menores a 212 mm/mes.

Martínez (2014) utilizó el modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para representar la cuenca del río Ica con fines de pronosticar el efecto del cambio climático en la oferta de agua al 2100. El modelo SWAT fue calibrado y validado para un período de 11 años (2000-2010) obteniéndose los valores de Nash- Sutcliffe (NSE) de 0.890 y 0.808 respectivamente, lo cual es indicador de un buen desempeño del modelo.

Castillo & Sarría (2018), investigadores de la Universidad de Murcia – España, evaluaron el efecto de la subdivisión de cuencas y la estimación de variables climáticas en la simulación hidrológica con el modelo SWAT en cuencas semiáridas mediterráneas. Se comprobó que los resultados son sensibles a las variables de entrada: precipitación y evapotranspiración de acuerdo al modelo escogido (Penman Montheit FAO o Hargreaves) siendo el uso de información climática distribuida frente a la información agregada que mejora notablemente los resultados.

León (2017), utilizó el modelo SWAT para investigar el comportamiento hidrológico futuro (al 2050) en la cuenca media y alta del río Piura. El modelo SWAT fue calibrado y validado para un periodo total de 23 años (1986 - 2008) obteniendo valores de Nash-Sutcliffe (NSE) y coeficientes de determinación (r^2) superiores al 75 por ciento en ambos, lo que indica un desempeño óptimo en la modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura considerando la incidencia del cambio climático.

Casas & Lavado (2017) realizaron la investigación titulada: “Desempeño de los modelos hidrológicos SWAT y GR2M en la cuenca hidrográfica del Amazonas en Perú: cuenca del río Mayo”. Los resultados del desempeño hidrológico del modelo SWAT demuestran que la contribución de precipitación anual es de 1567 mm de los cuales 789 mm se evapotranspiran siendo el rendimiento hídrico de la cuenca de 725 mm donde el 37% corresponde a la escorrentía superficial y el 63% al flujo base.

Fernández (2017) realizó el modelamiento hidrológico de la región hidrográfica del Titicaca, utilizando SWAT. Los resultados muestran que, en la etapa de calibración y validación del modelo en la simulación de descargas diarias, el desempeño fue bueno porque el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) estuvo entre 0.65 - 0.75 en todas las cuencas de estudio y de acuerdo a la medida estadística del porcentaje de bias (PBIAS) se tiene un desempeño muy bueno ($PBIAS < 10\%$) del modelo en las cuencas del río Huancané, Coata e Ilave; y un desempeño bueno ($PBIAS$ entre 10-15%) en la cuenca del río Ramis. El desempeño del modelo en la simulación de descargas mensuales aún es mucho mejor siendo estos muy buenos de acuerdo a ambas medidas de eficiencia ($NSE > 0.75$ y $PBIAS < 10\%$). Además del buen desempeño del modelo en la simulación de descargas, se verificó que el modelo tiene la capacidad de cuantificar la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base en términos del índice de flujo base (IBF) en todas las cuencas de estudio.

Sharafati & Pezeshki (2020) evaluaron la variabilidad del impacto del cambio climático en eventos extremos futuros (profundidad de las lluvias y descarga del río) sobre la cuenca de Dehbar en Irán. El impacto del cambio climático se evaluó utilizando cinco modelos de circulación general (MCG), incluidos EC-EARTH, GFDL-CM3, HadGEM2-ES, MIROC5 y MPI-ESM-MR con varios escenarios de emisión (por ejemplo, RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5). Los datos de descarga diaria se simularon con base en el modelo SWAT. Los eventos extremos anuales futuros (es decir, la profundidad de la lluvia y la descarga del río) se calcularon mediante análisis de frecuencia. Los resultados muestran que los valores máximos anuales futuros se incrementan significativamente, donde el mayor aumento ocurre en el caudal anual futuro del río y la profundidad de las precipitaciones según el EC-EARTH-RCP8.5 como 142% y 81% con el modelo MPI-ESM-MR-RCP8.5.

Sowjanya *et al.* (2018) investigaron las variaciones en el caudal del río Wardha, India, bajo condiciones climáticas cambiantes. Se utilizaron datos de modelos climáticos regionales (MCR) con una ruta de concentración representativa (RCP) de escenarios de 4.5 y 8.5 para simular el caudal para los períodos históricos y futuros con el SWAT. Se ha analizado el caudal simulado por SWAT para el período futuro dividiendo el período total en cuatro períodos de 20 años: 2020–2039, 2040–2059, 2060–2079 y 2080–2099. Los resultados sugieren una disminución en el caudal futuro en comparación con períodos anteriores. Las variabilidades intra e interanuales de los caudales para los períodos futuros son menos variables en comparación con el caudal observado.

Montecelos (2018) utilizó el modelo hidrológico SWAT para evaluar los impactos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Cauto al sureste de Cuba y en la cuenca del río Guadalupe al noroeste de México. SWAT se calibró y validó en ambas cuencas obteniendo un buen desempeño según tres métricas de rendimiento: el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación (r^2) y el sesgo porcentual (PBIAS), identificándose los parámetros que mejor describieron las características físicas en la hidrología de las dos regiones. El modelo reveló la naturaleza de los procesos de escorrentía superficial en la hidrología de la cuenca del río Cauto, mientras que en la cuenca del Río Guadalupe los parámetros relevantes fueron los de flujo base. Los parámetros calibrados tuvieron diferentes rangos de valores en cada región, lo que refleja una diferencia en los mecanismos generadores de escorrentía en las dos cuencas. El efecto del cambio climático se evaluó forzando el modelo SWAT con el Modelo de Circulación Regional (MCR) RegCM4.3 durante un periodo de referencia (1970-2000) y un período futuro (2015-2039) bajo el escenario de altas emisiones (RCP 8.5). Las proyecciones futuras en la cuenca del río Cauto sugieren aumentos regionales de 1.5 °C en la temperatura y una disminución del 38% en la precipitación media anual. Estos cambios se traducen en posibles reducciones en el caudal anual de hasta un 61% con respecto al período de referencia, mientras que la recarga de acuíferos en la cuenca se espera que disminuya hasta un 59%, con la consecuente reducción del flujo de agua subterránea. Por su parte en la cuenca del río Guadalupe se espera un aumento de 8% en la precipitación anual asociado con el aporte de la lluvia de invierno y verano, y un posible aumento de 1.2 °C en la temperatura media anual.

Asurza & Lavado (2020) utilizaron el modelo SWAT para la estimación de parámetros regionales en las cuencas de drenaje del Pacífico con el objetivo de estimar series de caudales diarios en dichas cuencas en el contexto de disponibilidad limitada de datos hidrológicos. Utilizaron la base de datos PISCO de precipitación diaria. 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 altas tasas de flujo durante los períodos húmedos. Estos hallazgos proporcionan información de apoyo para estudios de balance hídrico y manejo del agua en el drenaje del Pacífico peruano. El enfoque y los métodos desarrollados se pueden replicar en cualquier otra región del Perú.

2.2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.2.1. Hidrología

El sistema de la Tierra está compuesto por cuatro esferas: la ciencia atmosférica es el estudio de la atmósfera, la ciencia geológica es el estudio de la litósfera, la ciencia biológica es el estudio de la biósfera y la ciencia del agua, que consiste en hidrología y oceanografía, es el estudio de la hidrósfera. La hidrología se ha desarrollado rápidamente durante el último medio siglo y se ha convertido en un tema extenso como un sistema de muchas ramas (Rui, 2004). Según la naturaleza del agua estudiada, la hidrología puede clasificarse en hidrología de cuenca, hidrología fluvial, hidrología de lagos y embalses, hidrología de aguas subterráneas, hidrología estuarina y costera, hidrología de humedales, hidrología de glaciares, hidrometeorología, ecohidrología e hidrología global.

Según sus aplicaciones prácticas, la hidrología se puede clasificar en hidrología de ingeniería, hidrología de puentes, hidrología urbana, hidrología agrícola, hidrología forestal, hidrología de recursos hídricos e hidrología ambiental. Según la interdisciplinariedad o los métodos de investigación, se puede clasificar en hidrología dinámica, hidrología sistemática, hidrología estocástica, hidrología computacional, hidrología digital, hidrología geográfica, higrometría, hidrología informática, hidrología experimental e hidrología isotópica (Rui *et al.* 2013).

2.2.2. Cuenca hidrográfica

Es un espacio definido por la naturaleza, con base en la divisoria de las aguas y la escorrentía superficial. En la práctica, las zonas más altas y los cerros que circundan un río definen la cuenca hidrográfica; allí se ubican los recursos naturales, las ciudades, las actividades humanas, la infraestructura y servicios de las poblaciones (Guevara 2015).

La cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida para cada punto de su recorrido (Villón 2002).

Otro concepto de cuenca hidrográfica, dice que es el área delimitada por la dirección de sus cursos de agua y su superficie se definen por el parteaguas a partir del cual la precipitación drena por esa sección (Cotler 2010), siendo las cuencas, espacios socio - geográficos donde las personas y sus organizaciones comparten el territorio, sus identidades, tradiciones y culturas; socializan y trabajan en función de la disponibilidad de los recursos naturales.

Para Aparicio (1996), la cuenca es una zona de superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Desde el punto de vista práctico el Programa de Manejo Forestal Sostenible en la región andina, establece que la cuenca hidrográfica es vista como una unidad de planificación, negociación y extensión de acuerdos, porque el agua es uno de los recursos que actualmente provoca mayor preocupación en la sociedad. Se puede decir que la disponibilidad de agua es escasa debido a la contaminación y a la deforestación, y esto significa que las cuencas pierden su capacidad de retención, que es el principio clave en el manejo de una cuenca (PMFS 2011).

2.2.3. La cuenca hidrológica

La definición de cuenca hidrológica desarrolla un enfoque más integral que la de una cuenca hidrográfica. Las cuencas hidrológicas son unidades morfológicas integrales y además de incluir todo el concepto de cuenca hidrográfica, abarcan en su contenido, toda la estructura

hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo. Su función hidrológica se asemeja al de un colector que recibe la precipitación pluvial y la convierte en escurrimiento.

En la cuenca, ocurren diferentes fenómenos, entre ellos: la precipitación, la escorrentía, la infiltración y los demás procesos del ciclo hidrológico. En este sentido, para Alcántara (2015), citando a Castany (1971), la circulación está determinada esencialmente por las características de la precipitación y de los factores secundarios o factores condicionales. Los principales factores condicionales del régimen son:

- Las características geográficas y morfológicas.
- La geología y las características hidrogeológicas.
- La vegetación.
- El clima, entre otros.

2.2.4. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el tema central de la hidrología, es un punto útil desde el cual comienza el estudio de la hidrología. El ciclo comprende una serie de procesos continuos e interdependientes de movimiento y transferencia de agua en la tierra, océano, cuerpos de agua y atmósfera. El ciclo no tiene principio ni fin y se puede definir como el conjunto de trayectorias que describe el agua en la naturaleza, con independencia del estado en que se encuentre. De hecho, la hidrología abarca el estudio de cada uno de los componentes que constituyen el ciclo hidrológico de manera global y separada. El ciclo hidrológico permite definir entradas y salidas en la cuenca, de manera que puede determinarse un balance.

El conocimiento pleno de todos los componentes del ciclo hidrológico es una tarea ardua que conlleva un estudio pormenorizado y cuasi experimental. Hoy en día no se conocen de forma precisa cuantitativamente todos los componentes del ciclo hidrológico a nivel mundial. Cerca del 96.5% del agua del planeta se encuentra en los océanos. Del resto, el 1.7% se encuentra en los hielos polares, el 1.7% en manantiales subterráneos y únicamente el 0.1 % en forma de agua superficial y atmosférica. A pesar de que el contenido de agua en los sistemas superficiales y atmosféricos es relativamente pequeño, inmensas cantidades de agua pasan a través de ellos anualmente.

Los fenómenos hidrológicos son el producto de interacciones entre procesos atmosféricos y las condiciones de la superficie terrestre (Rui & Jiang 2010). Las mismas distribuciones temporales y espaciales de la lluvia que cae sobre diferentes superficies de la cuenca generarán inundaciones, procesos y series temporales hidrológicas diferentes; distribuciones temporales y espaciales de lluvia caída sobre la misma superficie terrestre de la cuenca también generará diferentes procesos de avenidas y series cronológicas hidrológicas. Según el nivel actual de comprensión, las complejidades de los fenómenos hidrológicos tienen las siguientes características:

- Primero, lo temporal y lo espacial: las variaciones de los fenómenos hidrológicos tienen características tanto determinísticas como no determinísticas, siendo esto último más obvio en muchos casos.
- Segundo, las características determinísticas en el rendimiento de los fenómenos hidrológicos tienen rasgos periódicos y no periódicos. Este último consiste en causalidad y tendencia.
- Tercero, los desempeños no determinísticos de los fenómenos hidrológicos pueden expresarse como aleatoriedad, características grises, borrosidad, mutabilidad, características del caos, etc. La aleatoriedad consiste en aleatoriedad pura, aleatoriedad estacionaria y aleatoriedad no estacionaria.
- Cuarto, los fenómenos hidrológicos tienen amplios tramos espaciales y temporales. La variabilidad temporal y espacial es muy grande en muchos casos.
- Quinto, la no similitud de los fenómenos hidrológicos a diferentes escalas es muy grande.
- Finalmente, sexto, en comparación con el fenómeno climático, los fenómenos hidrológicos son más sensibles a actividades humanas (Rui *et al.* 2013).

2.2.5. Procesos del ciclo hidrológico

2.2.5.1. Precipitación

La precipitación agrupa todas las aguas recogidas en una cuenca o zona determinada. Se presenta en forma líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, granizo, escarcha). La precipitación es la fuente principal de agua para las corrientes superficiales y subterráneas (Guevara 2015). La precipitación constituye la entrada primordial del sistema hidrológico y es el factor principal que controla la hidrología de una región. La evaporación desde la

superficie de los océanos es la principal fuente de humedad para la precipitación, ya que no más del 10% de la precipitación continental se puede atribuir a la evaporación en los continentes. Por otra parte, el 25% de la precipitación total que cae en áreas continentales regresa al mar como escorrentía directa o flujo de agua subterránea. Sin embargo, la cercanía a los océanos no necesariamente implica altas precipitaciones, como es el caso de islas desérticas. El conocimiento de los comportamientos y patrones de la lluvia en el tiempo y en el espacio es esencial para entender procesos como la variación de la humedad del suelo, recarga de acuíferos y caudal en los ríos (Aparicio 1996).

2.2.5.2. Escorrentía

La escorrentía es la parte de la precipitación que llega a la red hidrográfica de la cuenca y discurre por ella dando lugar a los caudales líquidos. Existen dos tipos de escorrentía generadoras de caudal: la escorrentía rápida, que discurren por la superficie de terreno y llegan a los cauces en poco tiempo y son causantes de los caudales punta de las avenidas. En segundo lugar, las escorrentías subsuperficiales y subterráneas que alimentan los cauces de una forma lenta y dan como resultado el caudal base (López 1998). La escorrentía superficial depende básicamente de:

- Factores climáticos: Relacionados con la precipitación y evaporación
- Factores fisiográficos: Ligados a las características físicas; como es la permeabilidad y coeficiente de escorrentía y características geométricas de la cuenca; tal como son el área, pendiente y forma.
- Factores de vegetación: Debido al tipo y densidad de vegetación determina el volumen de agua interceptada y evapotranspirada.
- Factores de naturaleza humana: Relacionados con la intervención humana (Romero *et al.* 1998).

A continuación, se detallan algunos modelos y tablas para el cálculo del coeficiente de escorrentía anual en una cuenca y se describe en extenso la Metodología analítica de la Curva Número para la estimación de la escorrentía superficial.

- **Fórmula de Nadal**

Nadal propuso la siguiente fórmula para el coeficiente de escorrentía:

$$C = 0.25 K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

Ec. 1

Donde K_1 es el factor de extensión de la cuenca, K_2 es el factor de lluvia media anual y K_3 el factor de pendiente y permeabilidad del suelo. En la Tabla 1 se presentan los valores que pueden tomar dichos factores.

Tabla 1: Valores de K_1 , K_2 y K_3 de la fórmula de Nadal para estimación de C

Extensión		Lluvia media anual		Características de la cuenca	K_3
Km^2	K_1	mm	K_2		
10	2.60	200	0.25		
20	2.45	300	0.50		
40	2.15	400	0.75		
100	1.80	500	1.00	Llana y permeable	0.5-0.7
200	1.70	600	1.10	Ondulada	0.7-1.2
500	1.40	700	1.17	Montañosa e impermeable	1.2-1.5
1000	1.30	800	1.25		
5000	1.00	900	1.32		
10000	0.90	1000	1.40		
20000	0.87	1200	1.50		

FUENTE: López (1998).

- **Tabla de Prevert**

Fue elaborada con observaciones realizadas en parcelas experimentales en Europa. En la Tabla 2 se presentan los valores del coeficiente de escorrentía según Prevert:

Tabla 2: Coeficientes de escorrentía según Prevert (%)

Uso del suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo		
		Areno-limoso Limoso-arenoso	Limoso Limoso-arcilloso	Arcilloso
Bosque	0-5	0.10	0.30	0.40
	5-10	0.25	0.35	0.50
	10-30	0.30	0.40	0.60
	>30	0.32	0.42	0.63
Pastizal	0-15	0.15	0.35	0.45
	5-10	0.30	0.40	0.55
	10-30	0.35	0.45	0.65
	>30	0.37	0.47	0.68
Cultivo agrícola	0-5	0.30	0.50	0.60

«continuación»

5-10	0.40	0.66	0.70
10-30	0.50	0.70	0.80
>30	0.53	0.74	0.84

FUENTE: López (1998).

- **Tabla de Molchanov**

Fue diseñada usando parcelas forestales, y sus resultados se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3: Coeficientes de escorrentía según Molchanov (%)

Tipo de escorrentía	Pendiente del terreno (°)	Densidad y uso de la cubierta vegetal	Tipo de suelo (textura)	C(%)
I	1-35	D≥0.6 Sin pastoreo	franco - arenoso	5
II	5-35	0.5>D>0.4 Con pastoreo ocasional	franco - pedregoso	6-25
III	5-40	0.4≥D>0.1 Con pastoreo permanente	franco - pedregoso	25-50
IV	5-40	0.4≥D>0.1 Con pastoreo intensivo	franco - pedregoso	50-75
V	5-40	0.4≥D>0.1 Con pastoreo intensivo	franco - pedregoso	>75

FUENTE: López (1998).

- **Fórmula de Keler**

Es aplicable para lugares con pluviometría total anual mayores o iguales a 500 mm y está definida por la siguiente ecuación:

$$C = a - \frac{b}{P} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde a es un coeficiente que oscila entre 0.88 y 1 (para cuencas torrenciales se aconseja emplear el valor máximo); b es un coeficiente que varía entre 350 y 460, siendo aconsejable que en cuencas torrenciales se emplee el valor mínimo. P es la precipitación anual o módulo pluviométrico.

- **Método del Número de Curva (CN)**

El número de curva del Servicio de Conservación del Suelo (SCS-CN, o CN) (Mockus 1964) ahora Servicio de Conservación de Recursos Naturales que ha mantenido vigente el procedimiento (NRCS, 2004), es un método ampliamente utilizado para estimar la escorrentía a partir de eventos de lluvia, el cual se ha adaptado a muchas partes del mundo con diferentes usos del suelo, tipos de cobertura del suelo y condiciones climáticas, además de haber sido aplicado con éxito a situaciones que van desde simples cálculos de escorrentía y uso de la tierra hasta la evaluación de simulaciones completas de calidad hidrológica (Muche *et al.*, 2019; Walega *et al.* 2020). De esta manera, el método del Número de Curva (CN) se constituye en una herramienta de gran valor para realizar estudios hidrológicos en cuencas hidrográficas, fundamentalmente cuando hay una deficiencia de registros extensos y confiables (Gaspari *et al.* 2007).

Lo más importante para la aplicación del procedimiento es la determinación de la precipitación inicial que no produce escorrentía directa. Esta magnitud se llama *abstracción inicial o umbral de escorrentía*. Para su evaluación se utilizan tablas en función de la textura del suelo (arenoso, arcilloso, ...), uso del suelo (bosques, cultivos, ...), pendiente, etc.

La familia de curvas que representan las Curvas Número se obtiene con la siguiente formulación:

Según aumenta la precipitación, la diferencia (P-Q) tiene un valor constante S, que representa la máxima infiltración. Si se denomina F a la infiltración que se ha producido una vez superado el umbral de escorrentía:

$$F = P - I_0 - Q \quad \text{Ec. 3}$$

y P_0 a la precipitación efectiva:

$$P_0 = P - I_0 \quad \text{Ec. 4}$$

Las cantidades P, Q, F y lo aparecen representadas en función del tiempo T, como ordenadas de las curvas correspondientes de la Figura 1:

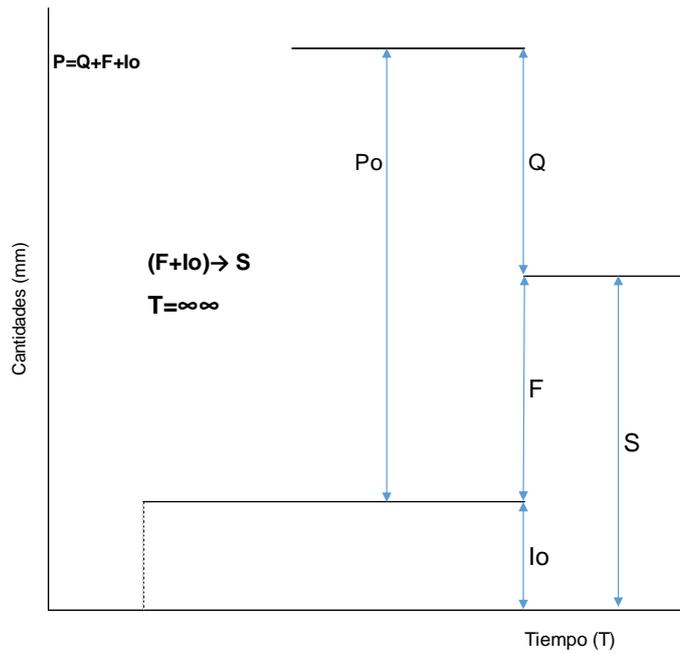


Figura 1: Formulación de la Curva Número

FUENTE: López (1998).

Donde P = lluvia total acumulada; P_0 = precipitación efectiva, Q = escorrentía directa; F = infiltración; I_0 = abstracción y/o deducción inicial, porción de lluvia caída antes de que la escorrentía se inicie.

El Soil Conservation Service (SCS) admite experimentalmente que:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P_0} \quad \text{Ec. 5}$$

Esta expresión se puede escribir:

$$\frac{P-I_0-Q}{S} = \frac{Q}{P-I_0} \quad \text{Ec. 6}$$

De donde:

$$Q = \frac{(P-I_0)^2}{P-I_0+S} \quad \text{Ec. 7}$$

De la observación de numerosas cuencas agrícolas, el SCS ha deducido que:

$$I_0 = 0.2S \quad \text{Ec. 8}$$

La experiencia práctica ha demostrado que I_a es aproximadamente el 20% de la retención potencial máxima, así $I_a = 0.2S$, por lo que la ecuación de escurrimiento puede escribirse como:

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad \text{Ec. 9}$$

El valor de S (en pulgadas) se relaciona con el número de curva de escorrentía (CN) por la definición:

$$CN = \frac{1000}{10+S} \quad \text{Ec. 10}$$

de lo cual se deduce que para zonas pavimentadas S será igual 0 y $CN=100$, mientras que las condiciones en que no se produce escurrimiento superficial S se hace infinito y $CN=0$.

De donde:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \text{ en pulgadas} \quad \text{Ec. 11}$$

$$S = 254\left(\frac{100}{N} - 1\right) \text{ en mm} \quad \text{Ec. 12}$$

De esta forma se puede obtener la escorrentía superficial Q en mm que produce una lluvia de P mm, sobre un complejo suelo – vegetación identificada con Número de Curva- CN.

Representando gráficamente la ecuación 11 para diversos valores de CN se obtienen las curvas que dan el nombre al método, y que se muestran en la Figura 2:

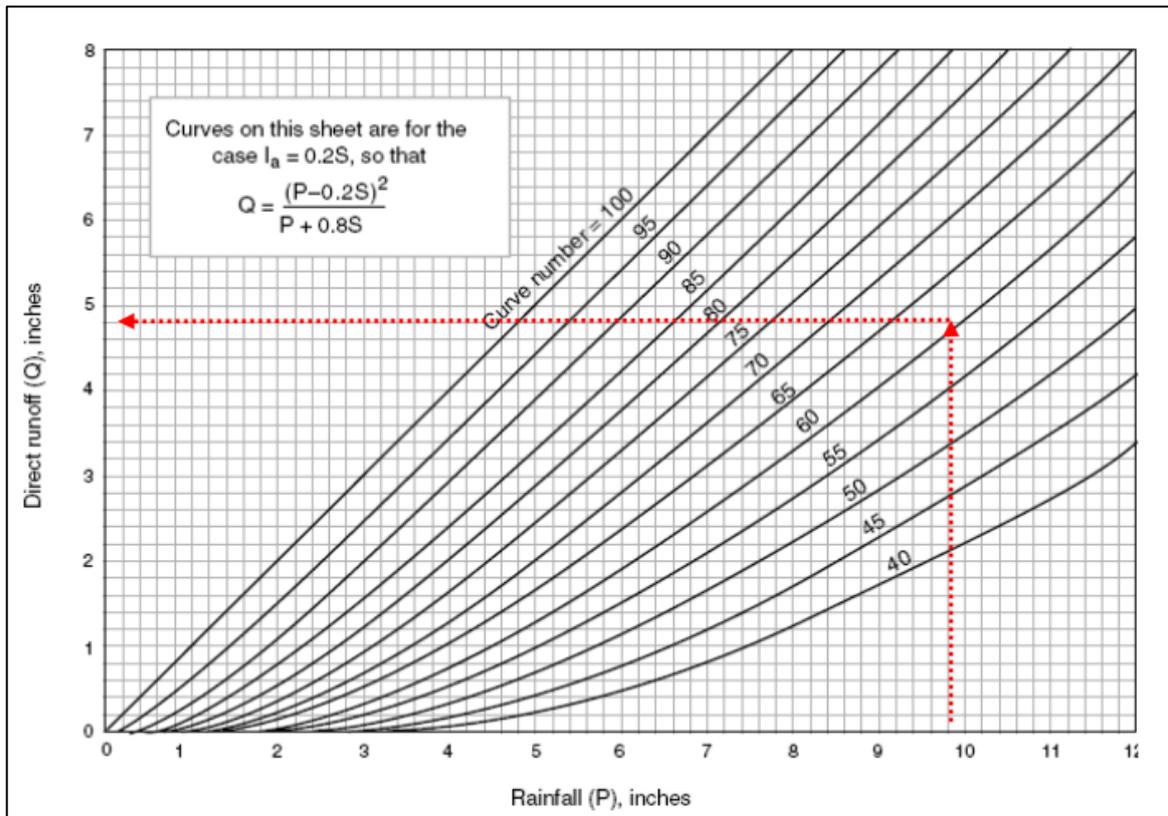


Figura 2: Gráfico original con las curvas numeradas

FUENTE: NRSC (1986).

Además, los grupos hidrológicos de suelo se clasifican (Tabla 4) según su capacidad para transmitir agua (capacidad de infiltración):

- **Grupo A.** Es el que ofrece menor escorrentía. Incluye los suelos que presentan una mayor permeabilidad, incluso cuando están saturados (intensidad alta de transmisión de agua). Comprenden los terrenos profundos, sueltos, con predominancia de arena o grava y con muy poco limo o arcilla (arenosos, arenosos - limosos, loes, etc.).
- **Grupo B.** Incluye los suelos de moderada permeabilidad cuando están saturados, comprendiendo los terrenos arenosos menos profundos que los del grupo A, aquellos otros de textura franco-arenosa de mediana profundidad y los francos profundos.
- **Grupo C.** Incluyen los suelos que ofrecen poca permeabilidad cuando están saturados (lenta), por presentar un estrato impermeable que dificulta la infiltración o porque en conjunto, su textura es franco arcillosa o arcillosa.
- **Grupo D.** Es el que ofrece mayor escorrentía. Incluye los suelos que presentan gran impermeabilidad, tales como los terrenos muy arcillosos profundos con alto grado de tumefacción, los terrenos que presentan en la superficie o cerca de la misma una capa

de arcilla muy impermeable y aquellos otros con subsuelo muy impermeable próximo a la superficie.

Tabla 4: Grupos hidrológicos de suelos

Clases texturales	
A- XII ARENOSA	B- VIII FRANCO - LIMOSA
XI ARENOSO - FRANCA	VII FRANCA
IX FRANCO - ARENOSA	X LIMOSA
C- VI FRANCO - ARCILLO - ARENOSA	D- III ARCILLO - ARENOSA
V FRANCO - ARCILLO - LIMOSA	II ARCILLO - LIMOSA
IV FRANCO - ARCILLOSA	I ARCILLOSA

FUENTE: USDA – SCS (1967).

En la Figura 3, se muestra el diagrama triangular utilizado para la determinación de la textura del suelo, que es conocido como clasificación USDA.

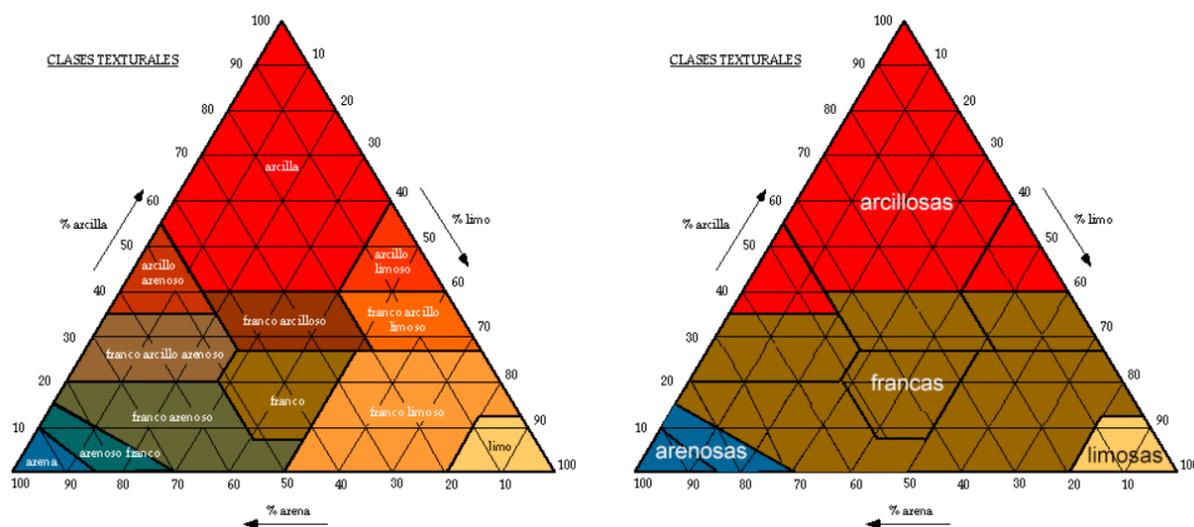


Figura 3: Diagrama triangular para determinación de la textura (clasificación USDA)

FUENTE: <http://www.edafologia.net/introeda/tema04/text.htm>

En las Tablas 5, 6, 7 y 8, se muestran los valores que toman los grupos hidrológicos de suelo, en función a sus condiciones hidrológicas, tratamiento o práctica y uso de la tierra o cubierta, para diferentes tipos de uso de suelo.

Tabla 5: Curva Número (CN) de escorrentía para diferentes usos de la tierra

Uso de la tierra o cubierta	Tratamiento o práctica	Condiciones hidrológicas	Grupo hidrológico			
			A	B	C	D
Barbecho	En surco	Deficientes	77	86	91	94
	En surco	Deficientes	72	81	88	91
	En surco	Buenas	67	78	85	89
Cultivos en líneas	En fajas a nivel	Deficientes	70	79	81	88
	En fajas a nivel	Buenas	65	75	82	86
	En fajas a nivel y terreno	Deficientes	66	74	80	82
	En fajas a nivel y terreno	Buenas	62	71	78	81
	En surco	Deficientes	65	76	84	88
Cultivos no alineados o con surcos pequeños o mal definidos - Cereales	En surco	Buenas	63	75	83	87
	En fajas a nivel	Deficientes	63	74	82	85
	En fajas a nivel	Buenas	61	73	81	85
	En fajas a nivel y terreno	Deficientes	61	72	79	82
	En fajas a nivel y terreno	Buenas	59	70	78	81
	En surco	Deficientes	66	77	85	89
Leguminosas muy densas o praderas en rotación	En surco	Buenas	58	72	81	85
	En fajas a nivel	Deficientes	64	75	83	85
	En fajas a nivel	Buenas	55	69	78	83
	En fajas a nivel y terreno	Deficientes	63	73	80	83
	En fajas a nivel y terreno	Buenas	51	67	76	80
			Deficientes	68	79	86
Pastizales (Pastos naturales)		Regulares	49	69	79	84
		Buenas	39	61	74	80
	En faja a nivel	Deficientes	47	67	81	88
	En faja a nivel	Regulares	25	59	75	83
	En faja a nivel	Buenas	6	35	70	79
Praderas (permanentes)		Buenas	30	58	71	78
Bosques (forestales)		Deficientes	45	66	77	83
		Regulares	36	60	73	79
		Buenas	25	55	70	77
Granjas y/o caseríos			59	74	82	86
Carreteras sin afirmar			72	82	87	89
Carreteras afirmadas			74	84	90	92

FUENTE: López (1998).

Tabla 6: Curva Número (CN) de escorrentía para áreas urbanas

Descripción de la cubierta Tipo de cubierta y estado hidrológico	% medio de superficie impermeable	Curva Número para cada grupo hidrológico de suelo			
		A	B	C	D
Áreas urbanas completamente desarrolladas (vegetación establecida)					
Espacios abiertos (césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.)					
Malas condiciones (cubiertas <50%)		69	79	86	89
Condición media (regular) (50< Fcc<75%)		49	69	79	84
Buenas condiciones (F>75%)		39	61	74	80
Superficies impermeables					
Aparcamientos pavimentados, tejados, carreteras, etc.		98	98	98	98
Calles asfaltadas y alcantarilladas		98	98	98	98
Cunetas asfaltadas		83	89	92	93
Gravas		76	85	89	91
Lodos		72	82	87	89
Áreas desérticas urbanas					
Paisajes naturales desérticos (solo sup. Perm.)		63	77	85	88
Paisaje desértico artificial (maleza impermeable, leñosas rastreras)		96	96	96	96
Distritos urbanos					
Comercial y de negocios	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Distritos residenciales según tamaño medio					
< ó = 500 m ²	65	77	85	90	92
1000 m ²	38	61	75	83	87
1350 m ²	30	57	72	81	86
2000 m ²	25	54	70	80	85
4000 m ²	20	51	78	79	84
8000 m ²	12	46	65	77	82
Áreas urbanas en desarrollo					
Superficies recientemente catalogadas					
(solo superficies permeables, sin vegetación)		77	86	91	94
Tierras sin uso (su CN se determina usando tipos de cubierta similares a los de la Tabla 2.5)					

FUENTE: López (1998); tomado de Ponce (1989).

Tabla 7: Curva Número (CN) de escorrentía para áreas forestales⁽¹⁾

Descripción de la cubierta Tipo de cubierta y estado hidrológico	Estado hidrológico	Curva Número para cada grupo hidrológico de suelo			
		A	B	C	D
Pastos, prados o forraje permanente para pastoreo ⁽²⁾	Malo	68	79	86	89
	Medio	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
Prados cubiertos permanentemente con hierba, protegidos del pastoreo y normalmente segados para heno (prados de siega)	-	30	58	71	78
Matorral, mezcla de matorral y maleza siendo el matorral el elemento prioritario ⁽³⁾	Malo	48	67	77	83
	Medio	35	56	70	77
	Bueno	30 ⁽⁴⁾	48	65	73
Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales) ⁽⁵⁾	Malo	57	73	82	86
	Medio	43	65	76	82
	Bueno	32	58	72	79
Bosques ⁽⁶⁾	Malo	45	66	77	83
	Medio	36	60	73	79
	Bueno	30	55	70	77
Granjas, construcciones, caminos, carreteras y alrededores	-	59	74	82	86

FUENTE: López (1998); tomado de Ponce (1989).

Nota:

- 1) Condiciones medias de humedad previa y $I_0=0.20S$
- 2) Malo: <50% de cubierta de suelo en sitios sobre - pastoreados sin cubierta de residuos
Medio: Entre el 50-75% de cubierta de suelo sin sobrepastoreo
Bueno: >75% de cubierta de suelo y ocasionalmente pastoreada.
- 3) Malo: <50% de cubierta del suelo.
Medio: Entre el 50-75% de cubierta del suelo.
Bueno: >75% de cubierta del suelo.
- 4) La CN real es < 30: utilizar CN=30 para cálculo de escorrentías.
- 5) Estas CN fueron calculadas para superficies con cubierta del 50% de bosque y 50% de hierba (pasto). Otras combinaciones de condiciones deben calcularse a partir de CN de bosques y pastos.
- 6) Malo: Los residuos de materia orgánica sin descomponer del bosque, los árboles pequeños y los arbustos se destruyen por pastoreo muy fuerte o quemas regulares.
Medio: Los bosques son pastoreados, pero no quemados y la materia orgánica sin descomponer cubre el suelo.
Bueno: Los bosques están protegidos del pastoreo y la materia orgánica sin descomponer y arbustos cubren el suelo adecuadamente.

Tabla 8: Curva Número (CN) de escorrentía para zonas de montañas áridas y semiáridas ⁽¹⁾

Descripción de la cubierta Tipo de cubierta y estado hidrológico	Estado hidrológico	Curva Número para cada grupo hidrológico de suelo			
		A	B	C	D
Herbácea: mezcla de hierba, maleza, matorral de bajo crecimiento, siendo el matorral el elemento de menor importancia	Malo		80	87	93
	Medio		71	81	89
	Bueno		62	74	85
Algarrobos, huarangos y molles*	Malo		66	74	79
	Medio		48	57	63
	Bueno		30	41	48
Labiadas con hierba bajo cubierta	Malo		67	80	85
	Medio		51	63	70
	Bueno		35	47	55
Mata desértica: la mayoría de las plantas son halófitas, plantas crasas, plantas con aceites esenciales	Malo	63	77	85	88
	Medio	55	72	81	86
	Bueno	49	68	79	84

* Cambió por el original roble/álamo

FUENTE: López (1998); tomado de Ponce (1989).

Nota:

- 1) Condiciones medias de humedad previa y $I_0=0.20S$. Para regiones húmedas utilizar tabla anterior
- 2) Malo: <30% de cubierta de suelo (M.O., hierba y arbustos).
Medio: Entre el 30-70% de cubierta de suelo.
Bueno: >70% de cubierta de suelo.
- 3) Los CN del grupo A sólo se han desarrollado para matas desérticas.

Se conocen y aceptan tres clases de condiciones de humedad antecedentes para una cuenca, según el SCS, considerando la cantidad de lluvia caída en el período de los cinco días anteriores, como se muestra en la Tabla 9. Las condiciones medias quedan incluidas en la condición II, que es en la que está elaborada la Tabla 9.

Tabla 9: Clasificación de la humedad antecedente en una cuenca

Clases de condiciones de humedad antecedente	Lluvia total de los 5 días anteriores (mm)	
	Estación sin desarrollo vegetativo	Estación de crecimiento vegetativo
I	< 12.7 mm	< 35.6 mm
II	12.7 - 27.9 mm	35.6 - 53.3 mm
III	> 27 mm	> 53.3 mm

FUENTE: López (1998).

Estas condiciones precedentes de humedad del suelo, son muy importantes, se valoran modificando el Número de Curva, como se aprecia en la Tabla 10:

Tabla 10: Conversión del número de curva de la condición II a las condiciones I y III

Número de Curva en la condición II	Número de Curva correspondiente a las condiciones	
	I	III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

FUENTE: López (1998).

La CN obtenida en la Tabla 9 corresponde a unas condiciones de humedad media (condición II). Si en el momento de producirse la precipitación el suelo se encuentra saturado debido a las lluvias precedentes, la escorrentía que debe esperarse será mayor (condición III); por el contrario, si el suelo está especialmente seco, la escorrentía será menor (condición I).

2.2.5.3. Infiltración

Para Castañeda & Barros (1994), la infiltración es el flujo de agua que transita desde el suelo hacia las zonas no saturada y saturada. La capacidad de infiltración está en función al flujo de agua por unidad de tiempo y de área total.

Los factores que afectan a la infiltración son:

- Tipo de cubierta vegetal.
- Características hidráulicas del suelo.
- Estado de humedad del suelo.
- Intensidad de la lluvia o cantidad de agua de riego.
- Trabajos agrícolas.

2.2.5.4. Escurrimiento base

El flujo subterráneo está conformado por el agua que fluye desde el almacenamiento del agua subterránea hacia los cauces. Este ocurre cuando los cauces interceptan el agua subterránea, ya sea desde el nivel freático como de acuíferos más profundos, este flujo es llamado caudal base.

Para la estimación del caudal base se puede utilizar el método estadístico del análisis de frecuencia, propuesto por el Instituto Geológico y Minero de España en el 2008 en la Guía Metodológica para la determinación de los caudales ambientales, donde se consideró el análisis de frecuencia como una de las metodologías para la estimación del caudal base. Este método utiliza la relación entre la magnitud y la frecuencia de determinados caudales, permitiendo ver cuando un río es influyente (perdedor) para realizar el cálculo. Se construye la curva de duración del flujo (FDC) la cual muestra el porcentaje del tiempo durante el cual se iguala o supera un determinado caudal. Esta curva puede construirse con datos diarios, mensuales o anuales y se puede aplicar a toda la serie de datos, a una parte o periodo concreto, o a periodos fijos intercalados. Se ordenan los datos de caudal de manera decreciente. A cada dato/medida se le asigna un factor correspondiendo 1 al caudal máximo y un factor n al caudal mínimo recogido el día n . Entonces se define la probabilidad de que un flujo se iguale o supere. El resultado normalmente se presenta en un gráfico semilogarítmico. La curva FDC da información sobre el caudal de base: Se caracteriza la forma de la curva y se extraen índices de caudal de base. Estos índices están muy correlacionados entre ellos y hay pocos trabajos que los relacionen con procesos de agua subterráneas puesto que los resultados se basan más en un análisis estadístico. El flujo mediano Q_{50} es el caudal igualado superado en un 50% del tiempo. La parte de la curva que fluye debajo del Q_{50} representa las condiciones de bajo caudal y si esta parte presenta una

pendiente baja se supone que el caudal de base es importante. Otros índices que se utilizan son:

- La relación entre los caudales que se superan el 90% del tiempo y los que superan en un 50% (Q_{90}/Q_{50}). Esta relación concretamente se puede utilizar para indicar el porcentaje de caudal que procede del almacenaje subterráneo (Nathan y McMahon, 1990).
- Caudales de uno o varios días que se superan a ciertos porcentajes de tiempo (75%, 90 o 95%), por ejemplo, $Q_{75}(2)$, $Q_{75}(7)$, $Q_{90}(15)$.
- El porcentaje de días con caudal cero.
- El periodo más largo de días sin caudal (Smakhtin 2001).

También se puede utilizar la curva de frecuencia de caudales bajos generada con series de flujos mínimos anuales. Muestra la proporción de años en que se supera un caudal bajo. Esto permite obtener el periodo de repetición que es el intervalo medio (en años) que el caudal se encuentra por debajo de un valor y se puede utilizar como indicativo de un caudal de base.

En este caso también se pueden utilizar varios índices:

- Cuando la pendiente de esta curva sea elevada se indicará una mayor variabilidad de los flujos mínimos.
- Interrupciones en la curva próximas al valor de la moda se pueden interpretar como un caudal formado exclusivamente por caudal de base.
- La media de los caudales más bajos de una serie de días consecutivos de intervalos prefijados.
- La media de series anuales de flujos medios mínimos de 7 días.
- Índices de flujos mínimos estacionales (por ejemplo, medias de 30 días en verano).

2.2.6. Balance hidrológico

El concepto de balance hidrológico tiene asociado los conceptos del ciclo hidrológico dentro de unos límites definidos de espacio y tiempo. El sistema hidrológico se define como una estructura, rodeada por una frontera, que acepta agua, opera con ella internamente y la produce como salida durante un período de tiempo concreto. El concepto espacial es amplio, ya que el balance hidrológico se puede realizar en la unidad hidrológica de cuenca, como es el caso de los embalses y el suelo. En estos casos los balances se realizan en distintos

volúmenes de control, sea el embalse o el suelo la unidad de referencia donde se estudian las entradas y las salidas producidas en el sistema (Sánchez 2003).

El balance se realiza en un momento determinado, lo que introduce el concepto de temporalidad. En ese instante de tiempo se calculan las entradas, las salidas y las variaciones de volumen ocurridas en el sistema. La ecuación de balance de masa establece que:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \frac{\text{Variación de Agua}}{\Delta t} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde Δt es la duración del instante de tiempo.

Según Pizarro (1996) la ecuación completa del balance hídrico es la siguiente:

$$P + R_i = Q + E + R_f \pm \Delta R \quad \text{Ec. 14}$$

Donde P es la cantidad de precipitación caída; Q es la escorrentía generada; E son las pérdidas (evapotranspiraciones); R_i las reservas de agua al inicio del período y $R_f \pm \Delta R$ son las reservas al final de período.

Esta ecuación puede simplificarse o hacerse más compleja dependiendo de la disponibilidad de datos, finalidad del cálculo, tamaño del territorio y duración del intervalo de tiempo del balance (Estrela 1992).

Pizarro y Torres (1998), suponen que al considerar períodos largos en tiempo o estables en cuanto a volumen generado, el término ΔR sería porcentualmente despreciable, originándose la ecuación reducida del balance hídrico, es decir, $Q = P - E$ (escorrentía igual a la precipitación menos el total de pérdidas ya definidas).

Los balances de agua medios se realizan habitualmente para un ciclo anual, lo cual resulta ser el problema más simple al poder despreciarse el cambio de almacenamiento en el territorio ΔR , que es difícil medir (Sánchez 2003). A largo plazo, el valor medio del mismo es porcentualmente poco importante y se asume como cero (Estrela 1992).

2.2.7. Parámetros geomorfológicos de una cuenca

Las formas del relieve de la superficie terrestre son el producto de la interacción entre los medios bioclimáticos y las condiciones litoestructurales a través del tiempo (Racca 2010). Estas características morfológicas del relieve y la cuantificación morfométrica de sus magnitudes son elementos esenciales para la interpretación de la influencia de éstas en la dinámica hidrogeomorfológica de cuencas de drenaje en ambientes montañosos (Méndez 2016). El conocimiento de los parámetros morfométricos del relieve condiciona el comportamiento hidráulico e hidrológico de la escorrentía, la estabilidad de los materiales de las vertientes, las propiedades físicas del suelo y las características erosivas dentro de una cuenca. Los parámetros morfométricos con mayor peso sobre la dinámica hidrogeomorfológica de las cuencas están representados por: pendiente media del relieve, altitud máxima, relieve máximo, concavidad del perfil longitudinal de la corriente principal y altitud de la naciente (Méndez 2016). A continuación, se describen los conceptos asociados a cada uno de los parámetros geomorfológicos de una cuenca:

2.2.7.1. Parámetros de relieve

Son de gran importancia puesto que el relieve de una cuenca tiene más influencia sobre la respuesta hidrológica que su forma; en general, podemos decir que a mayor relieve o pendiente la generación de escorrentía se produce en lapsos menores.

- **Área de la cuenca**

Es la proyección del parteaguas en un plano horizontal, dentro de la divisoria de aguas; es de forma irregular y se obtiene después de delimitar la cuenca mediante un planímetro o la utilización de un software SIG (Sistema de Información Geográfica) expresado en kilómetros cuadrados (Km²) o hectáreas (ha). Es importante mencionar que cuencas hidrográficas de igual área pueden tener comportamientos hidrológicos diferentes en función de los otros factores. La Tabla 11 muestra la clasificación de cuencas según su tamaño.

Tabla 11: Clasificación de las cuencas según su tamaño

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25-250	Pequeña
250-500	Intermedia-Pequeña
500-2500	Intermedia-Grande
2500-5000	Grande
> 5000	Muy Grande

FUENTE: Campos (1987).

- **Perímetro de la cuenca**

Es la longitud total del parteaguas proyectada en un plano horizontal. Puede ser obtenida mediante un curvímetero o con un software SIG. Se expresa en kilómetros (km) o metros (m).

El área y el perímetro de la cuenca tienen estrecha relación con la litología presente; una roca blanda da lugar a una cuenca bien drenada con área relativamente grande y con tendencias a formas redondeadas; por el contrario, roca resistente da lugar a cuenca alargada, pendientes fuertes, baja densidad de drenajes y áreas pequeñas (Díaz *et al.* 1999).

- **Coefficiente de masividad (C_m)**

La erosionabilidad de una cuenca está en función de la topografía, a igualdad de los otros factores. Para entender cómo afecta la topografía a la erosionabilidad de la cuenca se calcula el coeficiente de masividad, que representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie, según:

$$C_m = \frac{H_m}{A} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde C_m es coeficiente de masividad, H_m es la elevación media de la cuenca (m) y A es el área de la cuenca (km²). En la Tabla 12 se muestra la descripción de la cuenca según su coeficiente de masividad.

Tabla 12: Descripción de la cuenca según su coeficiente de masividad

Rangos de C_m	Descripción
0 -35	Moderadamente montañosa
35 -70	Montañosa
70 -105	Muy montañosa

FUENTE: Instituto Nacional de Ecología (2004).

- **Altura media (H)**

La altura media, H, es la elevación promedio referida al nivel de la estación de aforo de la boca de la cuenca. La variación altitudinal de una cuenca hidrográfica incide directamente sobre su distribución térmica y por lo tanto en la existencia de microclimas y hábitats muy característicos de acuerdo a las condiciones locales reinantes.

$$H = \frac{\sum(c_i a_i)}{A} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde H es la elevación media de la cuenca (m), c_i es la cota media del área i delimitada por dos curvas de nivel (m), a_i es el área entre curvas de nivel (km^2) y A es el área total de la cuenca (km^2).

La altura media constituye un criterio de la variación territorial del escurrimiento resultante de una región, el cual, da una base para caracterizar zonas climatológicas y ecológicas de ella. Puede ser calculado usando la curva hipsométrica o el histograma de frecuencias altimétricas. La estimación por una media aritmética ponderada en el caso del histograma, o de la curva hipsométrica calculando el área bajo la curva y dividiéndola por el área total.

- **Histograma de frecuencias altimétricas**

Histograma que indica el porcentaje de área comprendida ente dos alturas determinadas. Su cálculo se realiza a partir de un plano topográfico, calculando la superficie encerrada en curvas de nivel. El análisis de frecuencia altimétrica se utiliza para describir, en altitudes sucesivas, las frecuencias de ciertos niveles, como ser altitud de sitios, puntos más altos en mallas cuadradas de muestreo, altitudes de

cumbres o la de áreas de llanos o depresiones tales como hombreras, bancos y collados (Clarke 1968).

- **Curva hipsométrica**

La curva hipsométrica (Strahler 1952) permite conocer la distribución de masa en la cuenca desde arriba hacia abajo. Normalmente su forma es sigmoïdal, cóncava hacia arriba en la parte superior y convexa en la parte baja; el grado de sinuosidad es muy variable, lo mismo que la pendiente en el punto de inflexión. De ella se puede extraer la altitud mediana de la cuenca, la que corresponde al 50% del área acumulada, tal como se verifica en la Figura 4.

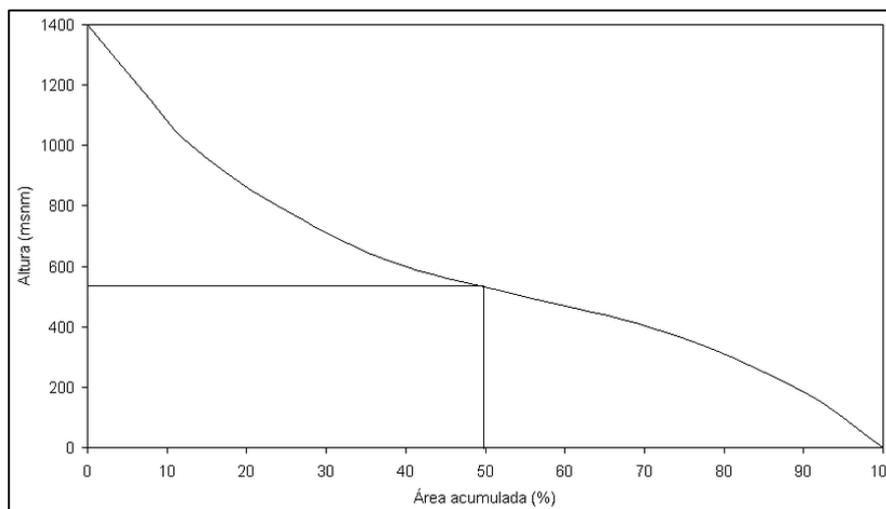


Figura 4: Altitud mediana de una cuenca

FUENTE: Méndez & Marcuzzi (2006).

La curva hipsométrica puede modificarse en función de la altura relativa y con ello estimar el estado de equilibrio dinámico potencial de la cuenca. De acuerdo con Strahler (1952) se muestran las curvas características para representar la etapa geológica, así como también el ciclo erosivo de la cuenca y del tipo de cuenca, con potencial evolutivo diferente, como se muestra en la Figura 5, donde la curva superior (1) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (2) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (3) es típica de una cuenca sedimentaria. Quedarían, así, representadas distintas fases de la vida de los ríos:

- Curva 1: fase de juventud
- Curva 2: fase de madurez
- Curva 3: fase de vejez

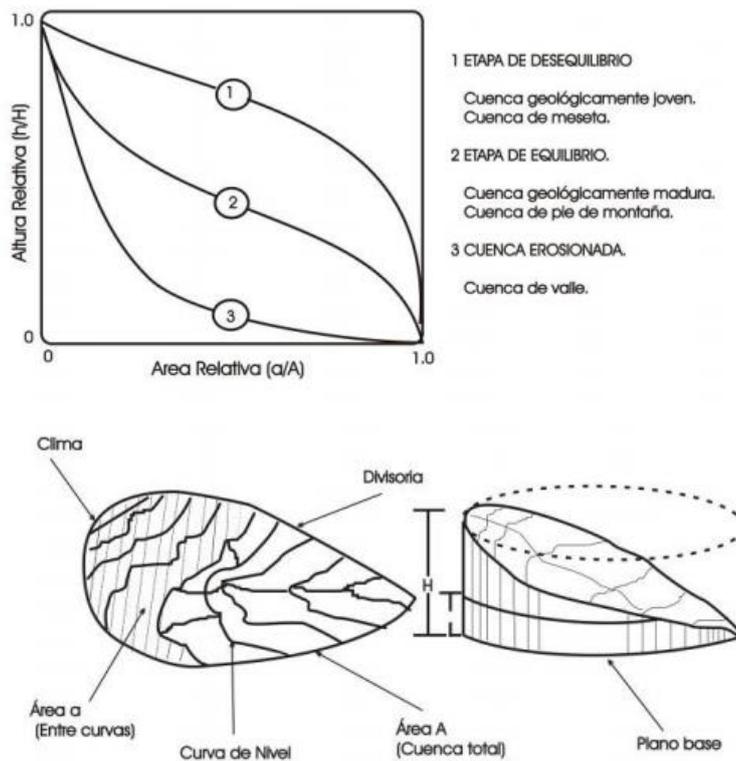


Figura 5: Curva hipsométrica según la edad del río

FUENTE: Ibañez *et al.* (2011).

Scheidegger (1987) rechaza esta clasificación aduciendo que el levantamiento tectónico es un proceso continuo y que, a lo largo de la historia de la cuenca, hay una tendencia a equilibrar las fuerzas antagónicas de construcción tectónica y degradación por erosión u otros mecanismos. Si un paisaje muestra un carácter permanente, estos dos procesos opuestos están en equilibrio dinámico. Scheidegger (1987) atribuye las diversas formas de la curva hipsométrica a los niveles de actividad de los procesos citados. Así, la curva 1 corresponde con una alta actividad, la curva 2 con una actividad media y la curva 3 con una actividad baja. El nivel de actividad no tiene por qué estar relacionado con la edad de la cuenca.

- **Coefficiente orográfico**

Este parámetro expresa el potencial de degradación de la cuenca, tiene en cuenta la altura sobre el nivel del mar la cual influye directamente en el flujo potencial del agua, y el área cuya inclinación ejerce acción directa sobre la escorrentía superficial.

Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_o = \frac{H_m^2}{A} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde C_o es el coeficiente orográfico, H_m es la altura media de la cuenca (km) y A es el área de la cuenca (km^2).

2.2.7.2. Parámetros de forma de una cuenca

La forma de una cuenca es determinante de su comportamiento hidrológico (cuencas con la misma área, pero de diferentes formas presentan diferentes respuestas hidrológicas, hidrogramas diferentes ante una lámina precipitada de igual magnitud y desarrollo), de ahí que algunos parámetros traten de cuantificar las características morfológicas por medio de índices o coeficientes.

- **Coefficiente o índice de compacidad (K_c)**

El índice de compacidad de una cuenca o índice de Gravelius (K_c), nos señala la mayor o menor compacidad de la cuenca a través de la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie que la cuenca. Su magnitud se obtiene con la ecuación 2.18.

$$K_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde K_c es el coeficiente de compacidad (adimensional), P es el perímetro de la cuenca en km y A es la superficie de la cuenca en km^2 . La Tabla 13 describe la forma de la cuenca según el índice de compacidad o Gravelius.

Tabla 13: Forma de la cuenca según el índice de compacidad o de Gravelius (K_c)

Clase de forma	Índice de compacidad (K_c)	Forma de la cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval-redonda a oval-oblonga
Clase III	> a 1.51	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

FUENTE: Guevara y Cartaya (1991).

Diversos estudios morfométricos de cuencas, consideran al índice de Gravelius como el parámetro adimensional que mejor explica la geometría de la cuenca y su influencia en las características de la escorrentía superficial según Horton (1945) y Strahler (1964).

La forma de una cuenca casi redonda a oval redonda ($1 < K_c \leq 1.25$), se caracteriza por originar tiempos de concentración relativamente cortos, generando hidrogramas de salida de tipo leptikúrtico, donde las crecidas son súbitas y violentas, con alto riesgo de inundaciones ante tormentas extraordinarias. La excesiva capacidad de drenaje de estos sistemas va siempre acompañada de altos potenciales erosivos y de transporte de sedimentos, pérdidas de escorrentía directa muy altas y recesiones cortas, en perjuicio de la recarga de acuíferos; características que se acentúan a medida que el índice de Gravelius se aproxima al límite inferior del rango.

La forma de una cuenca oval - redonda a oval - oblonga ($1.25 < K_c \leq 1.50$), tiene un comportamiento hidráulico muy similar a la forma oval redonda, solo que las respuestas van siendo cada vez menos intensas a medida que el índice de Gravelius se aproxima al límite superior del rango (1.50); en estos sistemas la peligrosidad de inundaciones frente a tormentas extraordinarias es menor que en la forma anterior (Strahler 1964).

La forma de una cuenca oblonga - alargada ($1.50 < K_c \leq 1.75$), se caracteriza porque los tiempos de concentración son relativamente mayores que en las dos formas anteriores, generando hidrogramas de crecidas efluentes del tipo platikúrtico, con caudales más sostenidos y recesiones más prolongadas. A diferencia de los dos tipos de geometría anterior, esta forma ofrece mayores ventajas para la recarga de acuíferos

y menores pérdidas por escorrentía directa; condiciones que van mejorando a medida que el índice de Gravelius se aproxima al límite superior del rango (1.75), también los riesgos por inundaciones ante tormentas extraordinarias son mucho menores (Strahler 1964).

- **Factor de forma (K_f)**

Es la relación entre el ancho medio y la longitud del cauce principal de la cuenca. El ancho medio se obtiene dividiendo el área de la cuenca por la longitud del cauce principal.

$$K_f = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2} \quad \text{Ec. 2.19}$$

Donde B es el ancho medio de la cuenca en km, A es el área de la cuenca en km² y L es la longitud del cauce principal de la cuenca en km.

En la Tabla 14 se muestra la forma que puede adoptar una cuenca según rangos aproximados del Factor de Forma.

Tabla 14: Forma de las cuencas según el factor de forma resultante (K_f)

Factor de forma (valores aproximados) (K_f)	Forma de la cuenca
<0.22	Muy alargada
0.22 a 0.30	Alargada
0.30 a 0.37	Ligeramente alargada
0.37 a 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 a 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 a 0.80	Ensanchada
0.80 a 1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

FUENTE: Horton (1945).

Las cuencas más alargadas tienden a una respuesta más difusa, en comparación con las respuestas de tormentas de caudales altos en cuencas compactas. Esto se debe a que la escorrentía que drena todos los límites de una cuenca compacta tiene distancias

similares de trayecto desde todos los cuadrantes y llega al colector principal al mismo tiempo, mientras que en cuencas de forma alargada al agua le cuesta más tiempo circular desde la parte alta de la cuenca hasta el final. Así pues, la forma de la cuenca y el modelo de red de drenaje se combinan para influenciar en el tamaño y forma de los picos de crecida a la salida de la cuenca (Gonzales de Matauco 2004).

- **Relación de Horton (R_f)**

El factor de relación de forma según Horton es un factor adimensional que expresa la relación existente entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud máxima de la cuenca. Entre más altos sean los valores de esta relación, más achatada será la forma de la cuenca (Tabla 15).

$$R_f = \frac{A}{L_m^2} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde R_f es el factor de forma de Horton, A es el área de la cuenca (km^2) y L_m es la longitud máxima de la cuenca (km).

Tabla 15: Forma de las cuencas según la relación de Horton (R_f)

Rangos de R_f	Forma de la cuenca
0.001-0.18	Muy poco achatada
0.19-0.36	Ligeramente achatada
0.37-0.54	Moderadamente achatada

FUENTE: Horton (1945).

- **Rectángulo equivalente**

Es un rectángulo que tiene igual superficie, perímetro, coeficiente de compacidad y distribución hipsométrica de la cuenca en estudio y permite observar la distribución altimétrica de las cuencas, así como cuan alargada es. Los lados de dicho rectángulo se calculan mediante las ecuaciones 21 y 22.

$$L = \sqrt{A} \left(\frac{K_c}{1.12} + \sqrt{\left(\frac{K_c}{1.12}\right)^2 - 1} \right) \quad \text{Ec. 21}$$

$$l = \sqrt{A} \left(\frac{K_c}{1.12} - \sqrt{\left(\frac{K_c}{1.12}\right)^2 - 1} \right) \quad \text{Ec. 22}$$

Donde L es el lado mayor (km), l es el lado menor (km), A es la superficie de la cuenca (km²) y K_c es el coeficiente de compacidad (adimensional).

- **Relación de elongación (R_e)**

Relación entre el diámetro de un círculo que tenga la misma superficie de la cuenca y la longitud máxima de la cuenca. La longitud máxima de la cuenca se define como la más grande dimensión de la cuenca a lo largo de una línea recta trazada desde la desembocadura del cauce principal hasta el límite extremo del parteaguas y de manera paralela al río principal. La ecuación propuesta por Schumm (1956) es la siguiente:

$$R_e = \frac{D}{L_m} = 1.129 \frac{\sqrt{A}}{L_m} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde R_e es la relación de elongación (adimensional), D es el diámetro de un círculo que tenga la misma superficie de la cuenca en km y L_m es la longitud máxima de la cuenca en km. La ecuación 23 es la más extendida para calcular la razón de elongación, debido a que es la que mejor correlación guarda con la hidrología de la cuenca. El significado físico de la relación de elongación para valores de R_e inferiores a 1 implicarán formas alargadas, cuanto menor sea R_e más alargada será la forma de la cuenca (Jardí 1985). Las cuencas con E=1,0 son de áreas de llanura, valores de E entre 0,6 y 0,9 indican un área de relieve acentuado. No obstante, sus valores se presentan entre 0,6 y 1,0 para una amplia variedad de regímenes climáticos y condiciones geológicas.

A diferencia de los anteriores índices analizados, la razón de elongación atiende a la relación del área con el cauce principal que la drena. Sin embargo, la denominación de cauce principal es variable y muy subjetiva, en casos en los que no se dan fundamentos ni de ángulo, ni de tamaño, ni de cotas, que diferencien una subcuenca de otra, especialmente cuando nos encontramos en bajos órdenes jerárquicos (Gonzales de Matauco 2004).

- **Relación de circularidad (R_{ci})**

El factor de circularidad de Miller (R_{ci}), Miller (1953) tomado - por Gonzales de Matauco (2004), es el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia equivalente al perímetro de la cuenca. Los valores oscilan entre 0 y 1, y el máximo valor equivale a la unidad, lo que correspondería a una cuenca de forma circular. Para cuencas de primer y segundo orden de materiales homogéneos (esquistos y calizas) R_{ci} varía entre 0,6 y 0,7. El factor de circularidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_{ci} = \frac{4\pi A}{P^2} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde R_{ci} es la relación de circularidad (adimensional), P es el perímetro de la cuenca (km) y A es la superficie de la cuenca (km²).

2.2.7.3. Parámetros de drenaje y/o de la red hidrográfica

La red de drenaje es el sistema jerarquizado de cauces, desde los pequeños surcos hasta los ríos, que confluyen unos en otros configurando un colector principal de toda una cuenca. Su función es el transporte de materia y energía en el interior de la cuenca. Desde una perspectiva ecológica es un ejemplo de auto organización. La morfología de la red, la densidad de drenaje y los órdenes jerárquicos alcanzados son parámetros fundamentales de estudio que dependen de los caracteres geomorfológicos y bióticos del sistema (Gonzales de Matauco 2004). Se define red hidrográfica al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas procedentes de los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos. Los parámetros de la red de drenaje, corresponden a la distribución o arreglo geométrico de los ríos tributarios que lo conforman (Cruz *et al.* 2015). Comprende la clasificación de los sistemas de drenaje, la cual se determinó bajo el método propuesto por Horton (1945).

- **Orden de ríos**

Es un número que refleja el grado de ramificación de cada uno de los ríos. Este método define escurrimiento de primer orden a aquel que carece de tributarios y uno de segundo orden que recibe al menos uno o varios tributarios del primer orden. El tercer orden lo confluyen uno o varios afluentes de segundo orden, pero puede recibir

directamente afluentes de primer orden; así sucesivamente se llega al orden más elevado, que debe corresponder al cauce principal de la cuenca. El orden de la cuenca está dado por el orden del río principal como se presenta en la Figura 6.

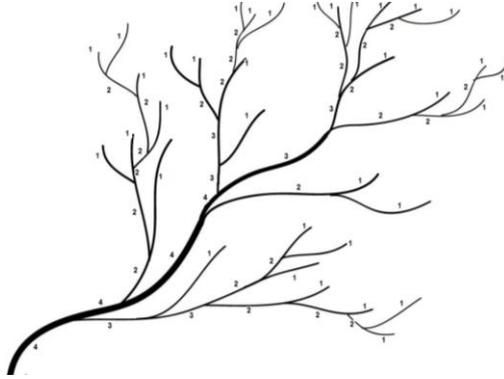


Figura 6: Orden de los ríos según esquema de Horton- Ejemplo río de orden 4

FUENTE: https://es.wikipedia.org/wiki/Red_de_drenaje

- **Relación de bifurcación (R_b)**

Es la relación entre el número de segmentos de corriente de un orden dado entre el número de tramos del orden mayor siguiente:

$$R_b = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde R_b es la relación de bifurcación (adimensional), N_i es el número de cauces de orden i y N_{i+1} es el número de cauces de orden $i + 1$.

Valores muy altos de esta relación, está determinado a terrenos escarpados con suelos muy erosionables. Además, que, estas cuencas presentan una amplia red hidrográfica con muchos cauces tributarios con rápida respuesta a la precipitación (Aparicio 1996).

- **Densidad de drenaje (D_d)**

Corresponde a la distribución o arreglo geométrico de los ríos tributarios que conforman la cuenca de drenaje (Cruz *et al.* 2015). Comprende la clasificación de los sistemas de drenaje, la cual se determinó bajo el método propuesto por Horton (1945), quien define escurrimiento de primer orden a aquel que carece de tributarios

y uno de segundo orden que recibe al menos uno o varios tributarios del primer orden. El tercer orden lo confluyen uno o varios afluentes de segundo orden, pero puede recibir directamente afluentes de primer orden; así sucesivamente se llega al orden más elevado, que debe corresponder al cauce principal de la cuenca. Por lo tanto, la relación de la suma de las longitudes de las corrientes entre el valor del área de la cuenca y se calcula con la ecuación 26.

$$D_d = \frac{L}{A} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde D_d es la densidad de drenaje (km/km^2), L es la suma de las longitudes de las corrientes (km) y A es el área de la cuenca (km^2).

Valores bajos de D_d generalmente están asociados con regiones de alta resistencia a la erosión, muy permeables y de bajo relieve. Valores altos fundamentalmente son encontrados en regiones de suelos impermeables, con poca vegetación y de relieve montañoso. Entonces este parámetro es un indicador de la eficiencia de drenaje de la cuenca. Valores referenciales, se muestran a continuación (Tabla 16).

Tabla 16: Valores interpretativos de la densidad de drenaje (D_d)

Densidad de drenaje (km/km^2)	Clases
<1	Baja
1.0 a 2.0	Moderada
2.0 a 3.0	Alta
> 3.0	Muy alta

FUENTE: Delgadillo & Moreno (2013).

- **Extensión media del escurrimiento superficial (E_s)**

Este parámetro muestra la distancia media que el agua de la precipitación tendrá que transportarse hasta un cauce de agua cercano. Su ecuación es la siguiente:

$$E_s = \frac{A}{4L_i} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde E_s es la extensión media de escurrimiento superficial (km), A es la superficie de la cuenca (km^2), y L_i es la longitud total de los cursos de agua (km).

- **Índice y/o coeficiente de torrencialidad (C_t)**

El índice de torrencialidad se define como el cociente entre el número de cursos de agua de primer orden (sin ningún afluente) y la superficie de la cuenca (km^2). A mayor número de cauces de orden uno y menor área, la torrencialidad de la cuenca será mayor (Romero 1987). Este resultado significa que el agua recorre muy poco para dirigirse a los cauces y la velocidad de descarga es mayor.

2.2.7.4. Parámetros de declividad

- **Pendiente media de la cuenca (S)**

Este índice representa un valor medio de todas las pendientes que conforman las diversas zonas topográficas de la cuenca. Las cuencas de mayores pendientes tienen una escorrentía más veloz y sus hidrogramas, por tanto, tienden a responder más rápidamente a la precipitación, incrementando los caudales punta (Sherman 1932; Horton 1945; Strahler 1964). Existen diversos criterios para el cálculo de la pendiente media. Por ejemplo, existe el método de la pendiente media con el criterio de Alvord, que analiza la pendiente existente entre curvas de nivel, trabajando con la faja definida por las líneas medias que pasan entre las curvas de nivel, según la Figura 7:

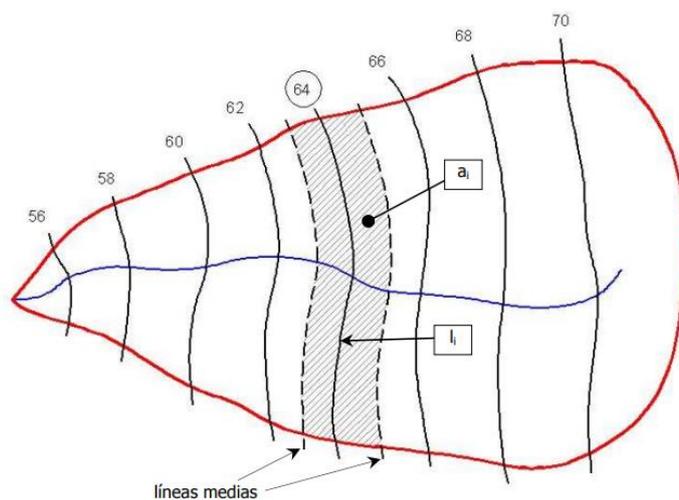


Figura 7: Esquema de análisis de cálculo de la pendiente media de una cuenca según Alvord

FUENTE: <http://ing.unne.edu.ar/pub/hidrologia/hidro-tp1.pdf>

$$S_i = \frac{D}{W_i} \quad \text{Ec. 2.28} \quad \text{y} \quad W_i = \frac{a_i}{l_i} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde S_i es la pendiente de la faja analizada i , D es el desnivel entre líneas medias, aceptado como desnivel entre curvas (equidistancia), W_i es el ancho de la faja analizada i , a_i es el área de la faja analizada i y l_i es la longitud de la curva de nivel correspondiente a la faja analizada i . La pendiente media de la cuenca es el promedio ponderado de la pendiente de cada faja en relación a su área:

$$S = \left(\frac{Dl_1 a_1}{a_1 A} \right) + \left(\frac{Dl_2 a_2}{a_2 A} \right) + \dots + \left(\frac{Dl_n a_n}{a_n A} \right) \quad \text{Ec. 30}$$

$$S = \frac{D}{A} (l_1 + l_2 + \dots + l_n) \quad \text{Ec. 31}$$

Finalmente,

$$S = \frac{DL}{A} \quad \text{Ec. 32}$$

Donde S es la pendiente media de la cuenca, L es la longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca y A es el área de la cuenca.

En la Tabla 17 se muestra los tipos de terreno en una cuenca según rangos aproximados de su pendiente media.

Tabla 17: Tipos de terrenos según su pendiente

Pendiente media (%)	Tipo de terrenos
0 a 2	Llano
2 a 5	Suave
5 a 10	Accidentado medio
10 a 15	Accidentado
15 a 25	Fuertemente accidentado
25 a 50	Escarpado
>50	Muy escarpado

FUENTE: Pérez (1979).

- **Pendiente equivalente constante del cauce principal (S_{eq})**

De acuerdo con el criterio de Taylor y Schwarz (1952), se considera que el río puede estar formado por una serie de tramo de igual longitud o bien por tramos de longitud variables. La pendiente media del cauce se determina con la ecuación 33.

$$S_{eq} = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad \text{Ec. 33}$$

Donde S_{eq} es la pendiente media del cauce, L es la longitud total del río, l_n es la longitud del tramo S_n es la pendiente del tramo n . La Tabla 18 proporciona los rangos aproximados de la pendiente media del cauce principal.

Tabla 18: Tipos de pendiente media del cauce principal

Pendiente media del cauce principal (%)	Tipo de pendiente
1 a 5	Suave
6 a 11	Moderado
12 a 17	Fuerte

FUENTE: IBAL (2009).

- **Índice de pendiente (I_p)**

El índice de pendiente es un valor medio de las pendientes de la cuenca. Se deduce a partir del rectángulo equivalente y su expresión es:

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=2}^n \sqrt{\beta_i (a_i - a_{i-1}) / 1000} \quad \text{Ec. 34}$$

Donde I_p es el índice de pendiente, a_i, a_2, \dots son las curvas de nivel consideradas en metros, β_i es la fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas a_i y a_{i-1} y L es la longitud mayor del rectángulo equivalente.

2.2.8. Tiempo de concentración de la cuenca

El tiempo de concentración es utilizado en el diseño hidrológico de estructuras para determinar su capacidad hidráulica máxima y es una variable que depende de las características geomorfológicas de la cuenca y de la precipitación. Según Llamas (1993), el tiempo de concentración también es conocido como el tiempo de respuesta o de equilibrio,

siendo el tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario, es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe.

Se atribuye muy comúnmente el tiempo de concentración al tiempo que tarda una gota de agua caída en el punto más alejado de la cuenca hasta el sitio de desagüe (Monsalve 1999). Lo cual no siempre se corresponde con el fenómeno real, pues pueden existir lugares en la cuenca en los que el agua caída tarde más en llegar al desagüe que el más alejado. Además, debe tenerse claro que el tiempo de concentración de una cuenca no es constante ya que depende ligeramente de las características de la lluvia (Vélez y Botero 2011).

El tiempo de concentración de la cuenca es el tiempo de viaje del punto que presenta el máximo valor y para calcularlo es habitual considerar el tiempo de viaje para el punto con recorrido más largo. El tiempo de concentración se puede calcular con diferentes fórmulas, las cuales han sido deducidas a partir de observaciones empíricas en cuencas con características particulares para cada fórmula, por lo que han de ser seleccionadas dependiendo del modelo hidrológico (Mateo 2010). Una práctica común en la Hidrología Aplicada es utilizar el valor medio eliminando los valores extremos (Chow *et al.* 1994).

Las fórmulas de Izzard, de la Federal Aviation Agency (FAA) y Kerby están deducidas a partir de flujos en superficies (tipo *sheet flow*). La mayoría de las fórmulas utilizan la pendiente del curso principal, a excepción de EOC (ecuación de onda cinemática) y la ecuación del Servicio de Conservación de Suelos de los EE.UU (SCS) que tienen en cuenta la pendiente de la cuenca. La ecuación de onda cinemática y la de Izzard tiene en cuenta la intensidad de la lluvia (o en su caso implícitamente el período de retorno), esto hace que el tiempo de concentración sea variable en función de la intensidad de la lluvia, lo que las hace muy interesantes. La ecuación de onda cinemática puede evaluarse mediante el coeficiente de rugosidad de Manning (n). La ecuación del SCS tiene en cuenta el número de curva (CN) con lo que implícitamente se tiene en cuenta características de la cuenca, como geología y usos del suelo.

A continuación, una lista de las diferentes expresiones con las cuales se puede calcular el

tiempo de concentración:

a. ASC Modificada:
$$t_c = \frac{0.007n^{0.8}L^{0.8}}{S^{0.4}P_2^{0.5}} \quad \text{Ec. 35}$$

b. Bransby – Williams: ecuación recomendada para cuencas menores a 75 km².

$$t_c = 14.6 L A^{-0.1} S^{-0.2} \quad \text{Ec. 36}$$

c. California Culvert Practice:
$$t_c = 60 \left[\frac{0.87075L^3}{H} \right]^{0.385} \quad \text{Ec. 37}$$

d. Clark:
$$T_c = 0.335 \left[\frac{A}{S^{0.5}} \right]^{0.593} \quad \text{Ec. 38}$$

e. Ecuación de retardo del SCS: El SCS desarrolló su ecuación como la suma de tiempos de viaje individual para diferentes regiones, desde zonas boscosas con cauces pendientes a planicies con escorrentía lenta y zonas impermeables.

$$T_c = 0.00593 \frac{L^{0.8}(Sp+25.4)^{0.7}}{Sc^{0.5}} \quad \text{Ec. 39}$$

$$Sp = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ec. 40}$$

f. Federal Aviation Agency (FAA): se emplea para cuencas urbanas asociadas a aeropuertos de los Estados Unidos.

$$t_c = 3.26 (1.1 - C) \frac{(1000 L)^{0.5}}{(100 S)^{0.333}} \quad \text{Ec. 41}$$

g. George Rivero:
$$t_c = \frac{16 L}{[(1.05 - 0.2 p) (100 S)^{0.04}]} \quad \text{Ec. 42}$$

h. Giandotti:
$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{S}L} \quad \text{Ec. 43}$$

- i. Henderson y Wooding: extraen su expresión de la onda cinemática para longitudes del orden de 100 m.

$$t_c = 0.94i^{-0.4} \left[\frac{n L_p}{\sqrt{S}} \right]^{0.6} \quad \text{Ec. 44}$$

- j. Izzard: utiliza su expresión en cuencas asociadas a autopistas y carreteras.

$$t_c = \frac{41.025(0.0007 i_p^{0.8} + c) L_p^{0.333} n^{0.605}}{i_p^{0.667} S^{0.333}} \quad \text{Ec. 45}$$

- k. Johnstone Cross: $T_c = 5 \left(\frac{L_m}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$ Ec. 46

- l. Kerby - Hathaway: recomendada para cuencas menores a 0,1 km².

$$t_c = \left[\frac{0.67 n L_p}{\sqrt{S}} \right]^{0.467} \quad \text{Ec. 47}$$

- ll. Kirpich: Se estimó originalmente para cuencas montañosas de Tennessee y Pensilvania en los Estados Unidos.

$$t_c = 0.0078 L_p^{0.77} S^{-0.385} \quad \text{Ec. 48}$$

- m. Método Racional Generalizado: $t_c = \left[\frac{60 n L}{H^{0.3}} \right]$ Ec. 49

- n. Morgali y Linsley: $t_c = \frac{0.933 L_p^{0.6} n^{0.6}}{i^{0.4} S^{0.3}}$ Ec. 50

- ñ. Passini: $T_c = \frac{[0.108 (A L)^{1/3}]}{S^{0.5}}$ Ec. 51

- o. Pérez: $T_c = \frac{L}{72 \left(\frac{H}{L} \right)^{0.6}}$ Ec. 52

- p. Pilgrim y McDermott: sugieren el uso de su ecuación para cuencas menores a 250 km².

$$T_c = 0.76A^{0.38} \quad \text{Ec. 53}$$

q. Ecuación de Onda Cinemática (EOC) $T_c = 7.275 \frac{L^{0.6} n^{0.6}}{S_c^{0.3} I_e S^{0.4}}$ Ec. 54

r. Snyder: $T_c = 1.2(L L_{cg})^{0.3}$ Ec. 55

s. Témez: $T_c = 0.3 \left[\frac{L}{S^{0.25}} \right]^{0.76}$ Ec. 56

t. Valencia y Zuluaga: $T_c = 1.7694A^{0.325} L^{-0.096} S_0^{-0.290}$ Ec. 57

u. Ventura Heras: $T_c = \alpha \frac{A^{0.5}}{S}$ $0.04 \leq \alpha \leq 0.13$ Ec. 58

Donde:

t_c = tiempo de concentración (min),

T_c = tiempo de concentración (horas),

L = longitud del curso principal (km),

H = diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m),

S = pendiente promedio del cauce principal (m/m),

S_0 = pendiente (%),

A = área de la cuenca (km^2),

L_p = longitud del cauce (pies),

L_{cg} = distancia desde la salida hasta el centro de gravedad de la cuenca (mi),

CN = número de curva,

C = coeficiente de escorrentía del método racional,

p = relación entre el área cubierta de vegetación y el área de la cuenca,

L_m = longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida (mi),

S = pendiente promedio de la cuenca (pies/mi),

S_c = pendiente promedio de la cuenca (m/m),

n = coeficiente de rugosidad de Manning,

P^2 = precipitación con un período de retorno de 2 años para una lluvia de duración de 24 horas (pulg),

S_p = máxima retención potencial (mm),

i_{es} = intensidad de precipitación (mm/hr),

i_p = intensidad de la lluvia (pies/s), α es un parámetro que depende de la pendiente.

Los resultados de la estimación del tiempo de concentración son muy diferentes entre sí puesto que cada autor estima su ecuación para unas cuencas con características muy particulares, por lo que debe tenerse mucho cuidado para la selección del valor más adecuado para el tiempo de concentración.

2.2.9. Índices de caracterización hidrológica de cuencas

Debido a la temática de la investigación, se ha creído por conveniente considerar y colocar los índices de caracterización hidrológica de cuencas de los Andes Tropicales, utilizados y reportados por Ochoa *et al.* (2016) en el artículo titulado “Impactos del uso de la tierra en la respuesta hidrológica de las cuencas andinas tropicales”. Cabe resaltar que son investigadores pertenecientes a la *Regional Initiative for Hydrological Monitoring of Andean Ecosystems* (iMHEA) quienes son una asociación de instituciones académicas y no gubernamentales pioneros en el monitoreo hidrológico participativo, dentro de los países andinos en colaboración con la sociedad civil.

En dicha investigación, las cuencas estudiadas pertenecen a cabeceras y tienen poca extensión superficial (entre 0.5 y 7.8 km²) estando ubicadas entre 0 y 17 ° Sur, cubriendo un rango de elevación de 2682 a 4840 m de altitud. Los sitios son rurales sin urbanización y no se ven afectados por las extracciones de agua o las alteraciones de los arroyos. La mayoría de las cuencas tienen una cubierta natural de maleza y otras hierbas, intercaladas con humedales, arbustos y parches de bosque nativo. Las formas son típicamente ovaladas y tienden a ser circulares o estiradas y las pendientes son empinadas y desiguales. Los principales usos del suelo son para la conservación, el pastoreo, la forestación y el cultivo.

A continuación, la Tabla 19 muestra el consolidado de los índices hidrológicos de importancia, con sus ecuaciones respectivas a escala de cuenca, que pueden ser utilizados para la caracterización hidrológica de cuencas de cabecera en la sierra del Perú.

Tabla 19: Índices hidrológicos de importancia a escala de cuenca

Abreviación	Fórmula	Unidades	Definición
Índices relativos a las características de precipitación			
SINDEX (Ec. 59)	$(1/P_{año})(\sum P_{mes} - P_{año} /12)(6/11)$	-	Índice de estacionalidad entre 0 (No estacional=todos los meses tienen igual precipitación) a 1 (extremadamente estacional, toda la lluvia anual ocurre durante un mes).
DAYP0 (Ec. 60)	$D_{P=0}/D_{total}$	%	Porcentaje de días con precipitación cero, con respecto al total de número de días en el período de monitoreo.
PVAR (Ec. 61)	σ_P/P_{media}	mm mm ⁻¹	Coefficiente de variación de la precipitación diaria en el período monitoreado (desviación estándar dividido por la media).
Índices relativos a las características del caudal			
RR (Ec. 62)	$Q_{año}/P_{año}$	-	Tasa entre el volumen de descarga promedio y precipitación en el período de monitoreo.
QVAR (Ec. 63)	σ_Q/Q_{media}	mm mm ⁻¹	Coefficiente de variación del caudal diario en el período monitoreado (desviación estándar dividido por la media).
R2FDC (Ec. 64)	$(\log_{10}(Q_{66}) - \log_{10}(Q_{33}))/ (0.66 - 0.33)$	-	Pendiente en la tercera mitad de la Curva de Duración en la escala logarítmica.
IRH (Ec. 65)	$\sum (Q_{Q<Q50}) / \sum (Q)$	-	Volumen de caudal bajo el 50avo percentil (Q50) en la Curva de Duración dividida por el volumen total.

FUENTE: Ochoa *et al.* (2016).

2.3. MODELOS EN HIDROLOGÍA

Según Sorooshian *et al.* (2008), un modelo es una representación simplificada del mundo real. El mejor modelo es el que da resultados cercanos a la realidad con el uso mínimo de parámetros y menor complejidad. Los modelos se utilizan principalmente para predecir el comportamiento del sistema y comprender varios procesos hidrológicos. Un modelo consta de varios parámetros que definen las características del modelo. Un modelo de escorrentía se puede definir como un conjunto de ecuaciones que ayuda en la estimación de la escorrentía en función de los diversos parámetros utilizados para describir las características de la cuenca. Los dos insumos principales requeridos para todos los modelos son datos de lluvia y área de drenaje. También se consideran las características del agua y propiedades del suelo, cubierta vegetal, topografía de la cuenca, contenido de humedad del suelo y características del acuífero (Devia *et al.* 2015). Sin embargo, es importante tener en cuenta

que en los países en desarrollo es necesario diseñar modelos más simples que puedan proveer una razonable simulación, requieran de pocos datos y permitan considerar la diferencia temporal con la que suceden los distintos fenómenos en la cuenca (Mishra y Singh 2004).

Los modelos hidrológicos son considerados como una herramienta importante y necesaria para la gestión de recursos hídricos y medioambientales (Devia *et al.* 2015).

La modelación hidrológica comienza a principios del siglo XIX utilizándose para el diseño de canales, redes de drenaje, presas, puentes, diques y sistemas de distribución de agua. Hasta mediados del siglo XX, la modelación hidrológica se limitó a tratar de explicar mediante expresiones matemáticas simples, los mecanismos individuales involucrados en los principales procesos del ciclo hidrológico. Entre ellos se pueden nombrar: el método racional, la curva de infiltración de Horton, los trabajos de Thornthwaite y Penman para la estimación de la evapotranspiración, entre otros (Weber *et al.* 2010).

El objetivo principal de los modelos de cuencas es obtener una mejor comprensión de los fenómenos hidrológicos que operan en un área de captación y cómo los cambios en la cuenca pueden afectar a estos fenómenos, así como para la generación de secuencias sintéticas de datos hidrológicos para el diseño de instalaciones o para su uso en el pronóstico (Mendoza *et al.* 2002). La realización de estudios hidrológicos en cuencas surge de la necesidad de comprender el balance hídrico, los procesos que controlan el movimiento del agua y sus posibles impactos en la cantidad y calidad del agua. La simulación hidrológica de las cuencas es una de las principales herramientas de planificación y gestión de recursos hídricos, desarrollada para evaluar los procesos que controlan el movimiento del agua a diferentes escalas espaciales y temporales (Spruill *et al.* 2000). Se puede usar para estimar la disponibilidad de agua, para predecir los flujos a corto y mediano plazo y para analizar la respuesta hidrológica de una cuenca debido a los cambios en el uso y la cobertura del suelo (Pereira *et al.* 2016).

2.3.1. Tipología de modelos matemáticos en hidrología según su clasificación estructural

2.3.1.1. Modelos empíricos (modelo métrico o modelo de caja negra)

Estos son modelos orientados a la observación y toman solo la información de datos existentes sin tener en cuenta las características y procesos del sistema hidrológico y, por lo tanto, estos modelos también se denominan **modelos basados en datos**. Implica ecuaciones matemáticas derivadas de series de tiempo de entrada y salida concurrentes y no de los procesos físicos de la cuenca. Estos modelos son válidos sólo dentro de los límites. El hidrograma unitario es un ejemplo de este método. Los métodos basados en estadísticas utilizan modelos de regresión y correlación y se utilizan para encontrar la relación funcional entre entradas y salidas (Devia *et al.* 2015). Un ejemplo típico de este tipo de modelos son los modelos estocásticos, en los cuales las entradas son transformadas en salidas sin necesariamente entender el proceso envuelto en la transformación (Mejía 2017). La ventaja de este tipo de modelos es la facilidad de uso, mientras que como inconvenientes principales tiene la imposibilidad de extrapolar un modelo empírico a zonas o condiciones distintas y el poco conocimiento que aporta al sistema (Figura 8).

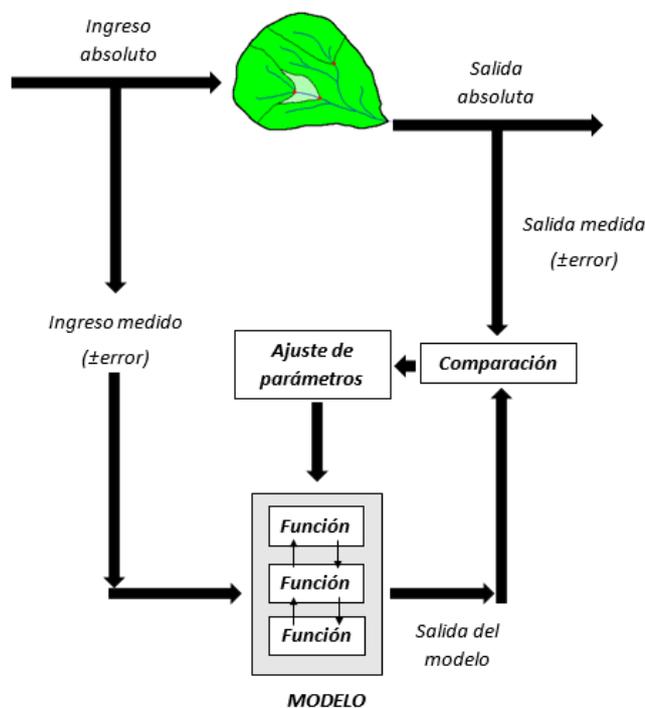


Figura 8: Esquema conceptual de modelos matemáticos en hidrología

FUENTE: Adaptado de Mejía (2017).

2.3.1.2. Modelos paramétricos, conceptualmente basados o modelos de caja gris

Este tipo de modelo describe todos los procesos hidrológicos componentes, proporcionándose un entendimiento parcial de éstos a través de asunciones empíricas (Mejía 2017). Consiste en una serie de reservorios interconectados que representan los elementos físicos en una cuenca en la que se recargan con lluvia, infiltración y percolación y se vacían con evaporación, escorrentía, drenaje, etc. Los parámetros se evalúan a partir de datos de campo además de la calibración en la cual se requiere un gran número de registros meteorológicos e hidrológicos. La calibración implica el ajuste de curvas, lo que dificulta la interpretación y, por lo tanto, el efecto del cambio en el uso del suelo no se puede predecir con mucha confianza (Devia *et al.* 2015). Muchos modelos conceptuales se han desarrollado con diversos grados de complejidad, por ejemplo, el modelo Stanford Watershed Model IV (SWM) es el primer modelo conceptual importante desarrollado por Crawford y Linsley en 1966. Este modelo matemático se desarrolló para simular el ciclo hidrológico sobre una cuenca de manera agregada y ha sido ampliamente aceptado como forma de obtener hidrogramas horarios o diarios a la salida de la cuenca. Es un modelo de parámetros agregados por lo que los requerimientos de datos son mucho menores que para los modelos distribuidos. Los datos de entradas al modelo son precipitaciones horarias o diarias, evapotranspiraciones potenciales diarias, y una amplia variedad de parámetros de la cuenca, hasta un número de 19, sujetos a calibración (Estrela 1992). Otro ejemplo es el TOPMODEL que es un modelo conceptual en el que los factores predominantes que determinan la formación de escorrentía están representados por la topografía de la cuenca y una línea de tendencia exponencial negativa, que vincula la transmisividad del suelo con la zona saturada subterránea (Gil y Tobón 2016).

2.3.1.3. Modelos físicamente basados, de caja blanca (relación precipitación – escorrentía)

Estos modelos son una representación matemáticamente idealizada del fenómeno real; también son llamados modelos mecanicistas o modelos basados en procesos que incluyen los principios y leyes de los procesos físicos como la conservación de la masa, energía o momentum utilizando variables de estado que son medibles y que están en función del tiempo y del espacio. Se denominan determinísticos porque las condiciones iniciales, condiciones de frontera y las entradas son especificadas previamente (Mejía 2017). Los procesos hidrológicos del movimiento del agua están representados por ecuaciones en

diferencias finitas. Cuando se aplica espacialmente, desde laderas hasta escalas continentales, este modelo puede incorporar la variabilidad espacio-temporal de los forzamientos primarios, como la precipitación, la radiación, y las variaciones de las propiedades de la superficie terrestre, por ejemplo, topografía, suelos, vegetación, etc., en la escala de sub-ladera, resuelve el dominio del subsuelo en direcciones horizontales y verticales de una manera que describe la heterogeneidad en una escala igual o mayor que un volumen elemental representativo, para medios porosos (Fatichi *et al.* 2016). No se requieren datos hidrológicos y meteorológicos extensos para su calibración, pero se requiere la evaluación de un gran número de parámetros que describen las características físicas de la cuenca (Abbott *et al.* 1986). En este tipo de modelos se requiere una gran cantidad de datos como: contenido de humedad del suelo, profundidad inicial del agua, topografía, topología, dimensiones de la red del río, etc. El modelo físico puede superar muchos defectos de los otros dos modelos debido al uso de parámetros que tienen interpretación física. Puede proporcionar una gran cantidad de información incluso fuera del límite y puede aplicarse a una amplia gama de situaciones (Abbott *et al.* 1986). Asimismo, los modelos basados en procesos permiten estimaciones distribuidas de humedad del suelo, evapotranspiración, el transporte de sedimentos y contaminantes en donde se justifica el modelado explícito de las rutas de flujo y los tiempos de residencia porque tienen un efecto dominante en la solución. Este tipo de modelos también brindan una mejor comprensión y simulación de las perturbaciones humanas de los sistemas hidrológicos, por ejemplo, los cambios en el clima y el uso de la tierra (Fatichi *et al.* 2016). Ejemplos de este tipo de modelos son los modelos SHE, MIKE SHE y SWAT (Abbott *et al.* 1986).

Tabla 20: Características de los modelos según su clasificación estructural

Modelos empíricos-matemáticos	Modelos conceptuales	Modelos físicamente basados-Modelos basados en procesos
Basado en datos medidos o modelos de caja negra. Son llamados “Modelos estocásticos”.	Paramétricos o modelos de caja gris.	Mecánicos o funcionales, modelos de caja blanca.
Envuelve ecuaciones matemáticas, valores derivados de series de tiempo disponibles.	Basados en modelamiento de reservorios, incluye ecuaciones empíricas con bases físicas.	Basados en distribuciones espaciales. Evaluación de parámetros describiendo características físicas.
Pocas consideraciones de características y procesos del sistema.	Los parámetros son derivados de datos de campo y calibración.	Requiere datos acerca del estado inicial del modelo y la morfología de las cuencas.
Alto poder predictivo, poca profundidad explicatoria.	Simples y pueden ser fácilmente implementados en códigos de cómputo.	Modelo complejo. Requiere experiencia humana y capacidad de cómputo.

«continuación»

No puede ser generado a otras cuencas.	Requiere gran cantidad de datos meteorológicos e hidrológicos.	Sufre problemas relacionados con la escala.
ANN, hidrograma unitario.	Modelo HBV, TOPMODEL	Modelos SHE o MIKESHE, SWAT.
Valido dentro del contorno de un dominio dado.	Calibración envuelve una curva de ajuste que hace dificultoso su interpretación física.	Válido para un rango amplio de situaciones.

FUENTE: Adaptado de Devia *et al.* (2015) y Mejía (2017).

2.3.2. Tipología de modelos hidrológicos de acuerdo al nivel de agregación

Los modelos determinísticos y los conceptuales pueden clasificarse en agregados: cuando el sistema es promediado en el espacio o considerado como un punto único sin dimensiones y distribuidos: en los cuales se considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales (Chow *et al.* 1994). Los modelos agregados consideran las cuencas y subcuencas como unidades de trabajo; en cambio, en los modelos distribuidos las unidades tienen generalmente menor tamaño y están definidas de forma más regular. Estas unidades no tienen un significado hidrológico tan definido ni representan elementos hidrográficos concreto (Zubieta 2013). Los modelos agregados han sido históricamente más utilizados que los distribuidos debido a las limitaciones tanto computacionales como de disponibilidad de datos (Vieux y Gaur 2008).

2.3.2.1. Modelos agregados

En este tipo de modelos, no se considera variabilidad espacial, o, dicho de otro modo, son modelos con una sola celda. Suponiendo que una cuenca hidrográfica vierte en un río, al modelarla de manera agregada consideraremos las entradas por precipitación (INPUT) y por otra parte los caudales en un punto en el río a la salida de la cuenca hidrográfica (OUTPUT). Los valores de los parámetros (evapotranspiración, infiltración, entre otros) son valores medios para toda la cuenca considerada. Las ventajas de estos modelos son que no necesitan la calibración de demasiados parámetros y una expresión matemática más sencilla, pero la desventaja es que los resultados son valores medios solamente (Fernández *et al.* 1997).

2.3.2.2. Modelos distribuidos

Freeze y Harlan (1969) sugirieron que, a través de la integración numérica de las ecuaciones diferenciales de varios sistemas, los flujos de superficie, subsuelo y base pueden describirse haciendo coincidir las soluciones de un subsistema con las condiciones de contorno relevantes de otro, de manera que la creación de un modelo matemático basado en el conocimiento físico distribuido se convertiría en la tendencia en el desarrollo del modelo. Esta propuesta pareció ser el inicio del estudio de modelos hidrológicos distribuidos, sin embargo, debido a la limitada tecnología del pasado reciente, una gran cantidad de información importante sobre la mayoría de las cuencas hidrográficas, por ejemplo, las características topográficas, no se obtuvo de manera rápida y precisa. La investigación sustantiva sobre modelos hidrológicos distribuidos no fue bien promovida y articulada hasta que apareció el modelo de elevación digital (DEM) (Bao *et al.* 2010). El avance en la capacidad de procesamiento y la difusión de los SIG han posibilitado que la modelización distribuida sea en la actualidad mucho más factible. En la medida en que los modelos distribuidos se usan más, la necesidad de principios científicos relacionados con la variabilidad espacial, la resolución espacial y temporal, el contenido de la información y la calibración se vuelve más evidente (Vieux y Gaur 2008).

2.3.3. Razones para el modelamiento hidrológico

El objetivo fundamental de la modelación hidrológica, es proveer información confiable para la adecuada administración de los recursos hídricos, es así que:

- a. Un modelo hidrológico puede ser usado para hacer estimaciones de las variables hidrológicas cuantitativas, eficientes y de costo razonable en cuencas sin mediciones, que permitirá la toma de decisiones en diseño y factibilidad económica del proyecto de un sistema hidráulico, planeamiento, operación y administración de obras hidráulicas que incluyen: tasas de flujo, volúmenes almacenados, carga de sales y sedimentos, posibilidades de regulación, calidad de agua, impactos en cambios de cantidad y calidad, entre otros.
- b. Un modelo hidrológico permite organizar y sistematizar gran cantidad de información hidrometeorológica y generar información a partir de un limitado número de datos y ser usados para llenar o reemplazar datos faltantes.
- c. Los modelos hidrológicos facilitan la simulación de procesos bajo diferentes condiciones naturales en la cuenca o bajo la influencia del hombre y proveen una

visión al interior de los procesos físicos, químicos y biológicos contenidos en el sistema hidrológico.

- d. Los resultados de la simulación mediante modelos hidrológicos, pueden ser utilizados para dar soporte estratégico a programas de investigación.
- e. En hidrología, no es posible obtener datos experimentales para todas las combinaciones de usos, tratamiento de tierras y regímenes hidrológicos. El poder predictivo de buenos modelos hidrológicos, puede proveer respuestas a diferentes escenarios y posibles condiciones de uso de las cuencas.
- f. Debido a que los resultados de los modelos hidrológicos pueden ser interpolados y extrapolados, el modelo se convierte en una herramienta que ayuda a predecir impactos de incertidumbre hidrológica tales como el cambio climático global, predicción de eventos hidrológicos aún no observados como inundaciones y sequías.
- g. Finalmente un modelo hidrológico bien estructurado, viene a ser una síntesis de un sistema hidrológico completo, permite dar conocimiento acerca de los componentes del sistema con la finalidad de dar una aproximación coherente del comportamiento de todo el sistema (Mejía 2017).

2.3.4. Procesos dominantes a diferentes escalas

Los procesos dominantes en la respuesta hidrológica difieren en las distintas escalas espaciales y deben ser tenidos en cuenta para el análisis correcto de los resultados. Al respecto, se puede asumir el siguiente esquema general:

- a. A escala de microcuenca (ríos de cabecera menores a 1 km^2), la respuesta a las precipitaciones es principalmente dominada por el proceso de generación de escorrentía en laderas y las áreas cercanas al río. Todos los procesos que definen el movimiento lateral del agua (superficial y subsuperficial) son controles de primer orden, así las propiedades del suelo y su uso juegan un rol clave al describir la respuesta hidrológica. En una resolución de mediano plazo, la distribución espacial de las precipitaciones se puede asumir que es mucho más uniforme que en cuencas más grandes (Stehr 2008).
- b. A escala de mesocuenas ($10 - 1000 \text{ km}^2$), los procesos a pequeña escala se combinan de una manera compleja de tal forma de entregar una respuesta integrada. A esta escala, los procesos dentro del cauce (ej. rastreo del caudal) aumentan su importancia al incrementarse el tamaño de la cuenca, la variación espacial y temporal de las

precipitaciones se torna de gran importancia.

- c. A escala de macrocuencas (cuencas mayores a 1000 - 10000 km²), la distribución espacial y temporal de las precipitaciones y el rastreo del caudal domina considerablemente el comportamiento de la respuesta (Stehr 2008).

2.3.5. Bondad de ajuste de modelos

Se puede hacer uso de las siguientes medidas de bondad de ajuste de modelos:

2.3.5.1. Coeficiente de calibración (r)

Expresa la dependencia lineal entre dos variables que, una independiente (X=caudales observados) y la otra dependiente (Y=caudales generados). Se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$r = \frac{S_{\text{obs,gen}}}{\sqrt{S_{\text{obs}}S_{\text{gen}}}} \quad \text{Ec. 66}$$

donde $S_{\text{obs,gen}}$, es la covarianza sin sesgo entre los caudales observados y generados:

$$S_{\text{obs,gen}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(Q_{\text{gen},i} - \bar{Q}_{\text{gen}}) \quad \text{Ec. 67}$$

Siendo $S_{\text{obs,gen}}$ son las variancias sin sesgo de los caudales observados y generados respectivamente:

$$S_{\text{obs}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \quad \text{Ec. 68 y}$$

$$S_{\text{gen}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{\text{gen},i} - \bar{Q}_{\text{gen}})^2 \quad \text{Ec. 69}$$

Describe el grado de relación lineal entre los datos generados (simulados) y los datos observados; el coeficiente de correlación oscila entre -1 a 1. Si $r = 0$, no existe relación lineal, si $r = 1$ o -1 , existe una perfecta relación lineal positiva o negativa.

2.3.5.2. Eficiencia de Nash - Sutcliffe (NSE)

El coeficiente de Nash - Shutcliffe es un estadístico normalizado que determina cuánto de la variabilidad de las observaciones (datos medidos) es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, NSE=1; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces NSE=0. La expresión matemática de E es la siguiente:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=t_1}^{t_f} (Q_{gen,t} - Q_{obs,t})^2}{\sum_{t=t_1}^{t_f} (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad \text{Ec. 70}$$

Donde $Q_{gen,t}$ es la descarga generada en un tiempo t (m^3/s); $Q_{obs,t}$ es la descarga observada en un tiempo t (m^3/s); \bar{Q}_{obs} es el promedio de descargas observadas en el periodo considerado (m^3/s).

2.3.5.3. Porcentaje del sesgo (PBIAS)

Es la diferencia entre la predicción esperada de nuestro modelo y los valores verdaderos.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{obs}} 100 \quad \text{Ec. 71}$$

Donde Q indica caudal, los superíndices “sim” y “obs” indican valores simulados y observados respectivamente.

2.3.5.4. Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

La Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE (Root Mean Squared Error) es una medida de desempeño cuantitativa utilizada comúnmente para evaluar métodos de pronóstico de demanda. En este contexto RMSE consiste en la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores cuadráticos. En comparación con la Desviación Media Absoluta o MAD, RMSE amplifica y penaliza con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud. La fórmula de cálculo del RMSE se muestra a continuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2} \quad \text{Ec. 72}$$

Donde Q indica caudal, los subíndices “sim” y “obs” indican valores simulados y observados respectivamente.

Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones luego del uso de modelos son resumidos en la siguiente Tabla 21:

Tabla 21: Criterios de rendimiento de modelos hidrológicos

Estadístico	Valores	Calificación de rendimiento
Coeficiente de Nash - Sutcliffe (NSE)	$0.75 < NSE \leq 1.00$	Excelente
	$0.65 < NSE \leq 0.75$	Bueno
	$0.50 < NSE \leq 0.65$	Satisfactorio
	$0.40 < NSE \leq 0.50$	Aceptable
	$NSE \leq 0.40$	Malo
Coeficiente de correlación (r)	$r \geq 0.5$	Satisfactorio
	$0 \leq r < 0.5$	Malo
Porcentaje del BIAS	$PBIAS < \pm 10$	Excelente
	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	Bueno
	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	Satisfactorio
	$PBIAS \geq \pm 25$	Malo
Raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE)	Valor inferior a la mitad de la desviación estándar	Satisfactorio
Relación entre la raíz cuadrada del error medio cuadrático y la desviación estándar. $RSR = RMSE / DESVESTA$	$0.00 < RSR < 0.50$	Excelente
	$0.50 < RSR < 0.60$	Bueno
	$0.60 < RSR < 0.70$	Satisfactorio
	$RSR > 0.70$	Malo

FUENTE: Moriasi *et al.* (2007).

2.4. MODELO PRECIPITACIÓN – ESCORRENTÍA DE LUTZ SCHOLTZ

Lutz Scholtz propuso un modelo hidrológico para cuencas de la sierra peruana, entre los años 1979 y 1980 en el marco de la Cooperación Técnica de la República de Alemania a través del Plan Meriss II, el cual ha sido utilizado por técnicos de entidades nacionales encargadas de la gestión de los recursos hídricos como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en el Perú. Este modelo es combinado, porque cuenta con una estructura determinística para el cálculo de los caudales mensuales para el año promedio (Balance Hídrico – Modelo Determinístico); y una estructura estocástica para la generación de series extendidas de caudal (Proceso Markoviano – Modelo Estocástico).

Determinado el hecho de la ausencia de caudales en la sierra peruana, el modelo se desarrolló tomando en cuenta parámetros físicos y meteorológicos de las cuencas, que puedan ser obtenidos a través de mediciones cartográficas y de campo. Los parámetros más importantes del modelo son los coeficientes para la determinación de la Precipitación Efectiva, déficit de escurrimiento, retención y agotamiento de las cuencas (Najarro 2015). Los procedimientos que se han seguido en la implementación del modelo son:

- Cálculo de los parámetros necesarios para la descripción de los fenómenos de escurrimiento promedio.
- Establecimiento de un conjunto de modelos parciales de los parámetros para el cálculo de caudales en cuencas sin información hidrométrica. En base a lo anterior se realiza el cálculo de los caudales necesarios.
- Calibración del modelo y generación de caudales extendidos por un proceso Markoviano combinado de precipitación efectiva del mes con el caudal del mes anterior.

Este modelo fue implementado con fines de pronosticar caudales a escala mensual, teniendo una utilización inicial en estudios de proyectos de riego y posteriormente extendiéndose el uso del mismo a estudios hidrológicos con prácticamente cualquier finalidad (abastecimiento de agua, hidroelectricidad etc.). Los resultados de la aplicación del modelo a las cuencas de la sierra peruana, han producido una correspondencia satisfactoria respecto a los valores medidos (Terán 2014).

a. Ecuación del Balance Hídrico en el modelo Lutz Scholtz

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

$$CM_i = P_i - D_i + G_i - A_i \quad \text{Ec. 75}$$

Donde CM_i es el caudal mensual (mm/mes), P_i es la precipitación mensual sobre la cuenca (mm/mes), D_i es el déficit de escurrimiento (mm/mes), G_i es el gasto de la retención de la cuenca (mm/mes) y A_i es el abastecimiento de la retención (mm/mes).

- i. Se asume que para períodos largos (en este caso el año 1) el Gasto y el Abastecimiento de la retención tienen el mismo valor es decir $G_i = A_i$ y

- ii. Que, para el año promedio, una parte de la precipitación retorna a la atmósfera por evaporación.

Reemplazando (P-D) por (C.P) y tomando en cuenta la transformación de unidades (mm/mes a m³/s) la ecuación anterior se convierte en:

$$Q=c' C.P.A \quad \text{Ec. 76}$$

Que es la expresión básica del Método Racional donde Q es el caudal (m³/s), c' es el coeficiente de conversión del tiempo (mes/s), C es el coeficiente de escurrimiento, P es la precipitación total mensual (mm/mes) y A es el área de la cuenca (m²).

b. Coeficiente de esorrentía (C)

En la literatura existen varias fórmulas para la estimación del coeficiente de esorrentía, sin embargo, hay que distinguir entre el caso de lluvias torrenciales para el cálculo de avenidas y el caso del caudal anual determinado a partir de la precipitación anual. Por ejemplo, Linsley (1977) indica valores de C para el diseño de drenes y otros pequeños proyectos de control de agua entre 0.05 y 0.85 dependiendo de la superficie; Chow (1994) indica valores de C entre 0.10 y 0.50 en función del tipo de suelo y la cobertura vegetal (C=0.35 para pastos sobre limo). En el caso del modelo Lutz Scholtz, éste recomienda utilizar la fórmula de L. Turc.

- **Fórmula de L. Turc**

Que fue establecida a partir de las observaciones hechas en 254 cuencas situadas en todos los climas del globo:

$$C = \frac{P-D}{P} \quad \text{Ec. 77}$$

Donde C es el coeficiente de esorrentía (adimensional), P es la precipitación total anual (mm/año) y D es el déficit de escurrimiento, que es la evapotranspiración del período considerado (mm/año).

Para la determinación de D se utiliza la expresión:

$$D = P \frac{1}{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Ec. 78}$$

$$L = 300 + 25(T) + 0.05(T)^3 \quad \text{Ec. 79}$$

Donde L es un coeficiente de temperatura y T es la temperatura media anual (°C).

Dado que no se ha podido obtener una ecuación general del coeficiente de escurrimiento para toda la sierra, existe la fórmula que es válida para la región sur, la cual fue determinada por la Misión Alemana en base a las observaciones realizadas en la región del Cusco y Huancavelica:

$$C = 3.16E12(P^{-0.571})(EP^{-3.686}) \quad r = 0.96 \quad \text{Ec. 80}$$

$$D = -1380 + 0.872(P) + 1.032(EP); \quad r = 0.96 \quad \text{Ec. 81}$$

Donde C es el coeficiente de escurrimiento, D es el déficit de escurrimiento (mm/año), P es la precipitación total anual (mm/año), EP es la evapotranspiración anual según Hargreaves (mm/año) y r es el coeficiente de correlación.

Adicionalmente, la Misión Alemana estableció ecuaciones empíricas para el cálculo del coeficiente de escurrimiento para la zona de Junín (Tabla 22), las cuales se probaron en esta investigación:

Tabla 22: Ecuaciones empíricas para el cálculo de C en la región Junín

Nº Ecuación	Ecuación empírica	Coef. Correlación	Variables involucradas
82	$\hat{C} = -0.053 + 2.57E^{-4}P + 0.0245T$	r = 0.85	Precipitación y temperatura
83	$\hat{C} = 2.24 - 0.0661T + 0.0544T^2$	r = 0.91	Temperatura
84	$\hat{C} = 783P^{0.345}EP^{-1.438}$	r = 0.82	Precipitación y evapotranspiración
85	$\hat{C} = 50.6 - 0.088EP + 3.84E^{-5}EP^2$	r = 0.91	Evapotranspiración
86	$\hat{C} = 5.33 + 0.0858 \text{Ln}P - 0.796 \text{Ln}EP$	r = 0.80	Precipitación y evapotranspiración

FUENTE: Plan Meriss II (1980).

Asimismo, para la estimación del coeficiente de escorrentía de las cuencas de estudio, se utilizó la expresión propuesta por Keler y basadas en ella, se obtuvieron relaciones empíricas válidas para la zona de estudio:

$$C = a - \frac{b}{P} \quad \text{Ec. 87}$$

Donde a es un coeficiente indicador del relieve (entre 0.88 y 1), en este caso a = 1 (Pendientes S >15% propio de cuencas montañosas) y b es un coeficiente indicador de la capacidad de retención de la cuenca (entre 350 y 550) a mayor capacidad de retención, mayor valor de b.

c. Estimación de la evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial puede ser estimada por la fórmula de Hargreaves:

$$EP = 0.0075 (RSM)(TF)(FA) \quad \text{Ec. 88}$$

$$RSM = 0.075 (RA) \sqrt{(n/N)} \quad \text{Ec. 89}$$

$$FA = 1 + 0.06(AL) \quad \text{Ec. 90}$$

Donde RSM es la radiación solar media, TF es la componente de temperatura, FA es el coeficiente de corrección por elevación, TF es la temperatura media anual (°F), RA es la radiación extraterrestre (mm H₂O /año), (n/M) es la relación entre insolación actual y posible (%) y AL es la elevación media de la cuenca (km). Para determinar la temperatura anual se toma en cuenta el valor de los registros de las estaciones y el gradiente de temperatura de -5.3 °C/1000 m, determinado para la sierra.

d. Precipitación efectiva

Para el cálculo de la precipitación efectiva se supone que los caudales promedio observados en la cuenca pertenecen a un estado de equilibrio entre gasto y abastecimiento de la retención. La precipitación efectiva se calcula para el coeficiente de escurrimiento promedio, de tal forma que la relación entre precipitación efectiva y precipitación total, resulta igual al coeficiente de escorrentía.

Para fines hidrológicos, se toma como precipitación efectiva la parte de la precipitación total mensual, que corresponde al déficit según el método del *United*

States Bureau of Reclamation (USDA, 1967), la precipitación efectiva hidrológica es la antítesis de la precipitación efectiva en los cultivos. La Tabla 23 muestra los valores de precipitación efectiva según el incremento de la precipitación por cada tipo de curva.

Tabla 23: Precipitación efectiva (PE) según el Bureau of Reclamation

P mm	PE (mm)		
	Curva I	Curva II	Curva III
0.0	0.0	0.0	0.0
10.0	0.0	1.0	2.0
20.0	0.0	2.0	4.0
30.0	0.0	3.0	6.0
40.0	0.5	4.0	8.0
50.0	1.0	6.0	11.0
60.0	1.5	8.0	14.0
70.0	3.0	10.0	18.0
80.0	4.0	14.0	24.0
90.0	5.5	18.0	30.0
100.0	8.0	23.0	39.0
110.0	11.0	29.0	48.0
120.0	15.0	36.0	58.0
130.0	19.0	43.0	68.0
140.0	24.0	52.0	78.0
150.0	30.0	60.0	88.0
160.0	37.0	69.0	98.0
170.0	45.0	79.0	108.0
180.0	55.0	89.0	118.0

UENTE: USDA (1967).

A fin de facilitar el cálculo de la precipitación se ha determinado el polinomio de quinto grado:

$$PE = a_0 + a_1P + a_2P^2 + a_3P^3 + a_4P^4 + a_5P^5 \quad \text{Ec. 91}$$

Donde PE es precipitación efectiva en mm/mes, P es precipitación total mensual en mm/mes, a_i es el coeficiente del polinomio.

La Figura 9 muestra la porción de precipitación por tipo de curva, correspondiéndole a curva I un coeficiente de escorrentía (C) igual a 0.15, curva II un C de 0.30 y para la curva III un C de 0.45.

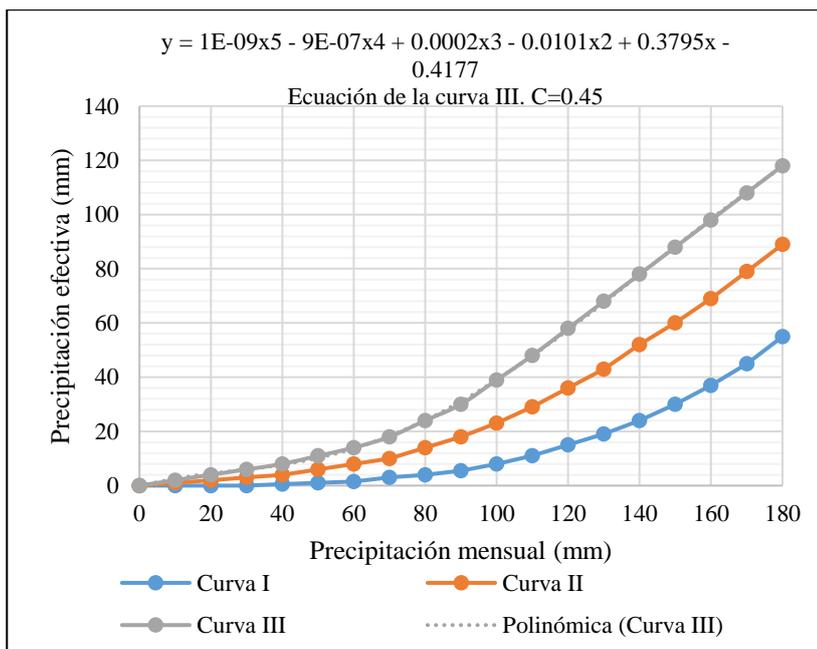


Figura 9: Porción de precipitación efectiva

FUENTE: Plan Meriss II (1980).

La Tabla 24 muestra los valores límite de la precipitación efectiva y la Tabla 25 muestra los coeficientes a_i que permiten alcanzar por interpolación los valores de C comprendidos entre 0.15 y 0.45.

Tabla 24: Límite superior para la precipitación efectiva

Tipo de Curva	PE	Límite
Curva I	$PE = P - 120.6$	$P > 177.8$ mm/mes
Curva II	$PE = P - 86.4$	$P > 152.4$ mm/mes
Curva III	$PE = P - 59.7$	$P > 127.0$ mm/mes

FUENTE: Plan Meriss II (1980).

Tabla 25: Coeficientes para el cálculo de la precipitación efectiva

	Curva I	Curva II	Curva III
a_0	-0.047000	-0.106500	-0.417700
a_1	0.009400	0.147700	0.379500
a_2	-0.000500	-0.002900	-0.010100
a_3	2.00E-05	5.00E-05	2.00E-04
a_4	-5.00E-08	-2.00E-07	-9.00E-07
a_5	2.00E-10	2.00E-10	1.00E-09

FUENTE: Plan Meriss II (1980).

De esta forma es posible llegar a la relación entre la precipitación efectiva y precipitación total de manera que el volumen anual de la precipitación efectiva sea igual al caudal anual de la cuenca respectiva:

$$C = \frac{Q}{P} = \sum_{i=1}^{12} \frac{PE_i}{P} \quad \text{Ec. 92}$$

Donde C es el coeficiente de escurrimiento, Q es el caudal anual y P es la precipitación total anual y $\sum_{i=1}^{12} \frac{PE_i}{P}$ es la suma de la precipitación efectiva mensual.

e. Retención de la cuenca (R_i)

Bajo la suposición de que exista un equilibrio entre el gasto y el abastecimiento de la reserva de la cuenca y además que el caudal total sea igual a la precipitación efectiva anual, la contribución de la reserva hídrica al caudal se puede calcular según las fórmulas:

$$R_i = CM_i - P_i \quad \text{Ec. 93}$$

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i \quad \text{Ec. 94}$$

Donde CM_i es el caudal mensual (mm/mes) PE_i es la precipitación efectiva mensual (mm/mes), R_i es la retención de la cuenca (mm/mes), G_i es el gasto de la retención (mm/mes), A_i es el abastecimiento de la retención. R_i = G_i para valores mayores que cero (mm/mes). R_i = A_i para valores menores que cero (mm/mes). Sumando los valores de G o A respectivamente, se halla la retención total de la cuenca para el año promedio, que para el caso de las cuencas de la sierra (análisis realizado a 19 cuencas) varía de 43 a 188 mm/año (Tabla 26).

Tabla 26: Lámina acumulada según tipo de aporte dentro de la cuenca (mm/año)

Tipo de aporte	Lámina acumulada (mm/año)		
	Pendiente de la cuenca		
	2%	8%	12%
Napa freática	300	250	200
Lagunas - pantanos		500	
Nevados		500	

FUENTE: Plan Meriss II (1980).

f. Relación entre descargas (Q_t/Q_0)

Durante la estación seca, el gasto de la retención alimenta los ríos, constituyendo el caudal o descarga básica. La reserva o retención de la cuenca se agota al final de la estación seca; durante esta estación la descarga se puede calcular en base a la ecuación:

$$Q_t = Q_0 e^{-at} \quad \text{Ec. 95}$$

Donde Q_t es la descarga en el tiempo t , Q_0 es la descarga inicial, a es el coeficiente de agotamiento y t es el tiempo.

Al principio de la estación lluviosa, el proceso de agotamiento de la reserva termina, comenzando a su vez el abastecimiento de los almacenes hídricos. Este proceso está descrito por un déficit entre la precipitación efectiva y el caudal real. En base a los hidrogramas se ha determinado que el abastecimiento es más fuerte al principio de la estación lluviosa continuando de forma progresiva pero menos pronunciada, hasta el final de la estación.

g. Coeficiente de agotamiento (a)

Mediante la ecuación 97 se puede calcular el coeficiente de agotamiento “ a ”, en base a datos hidrométricos. Este coeficiente no es constante durante toda la estación seca, ya que va disminuyendo gradualmente. Con fines prácticos, se puede despreciar la variación del coeficiente “ a ” durante la estación seca empleando un valor promedio.

El coeficiente de agotamiento de la cuenca tiene una dependencia logarítmica del área de la cuenca.

$$a = f(\ln A) \quad \text{Ec. 96}$$

$$a = 3.1249 E 67(A)^{-0.1144} (EP)^{-19.336} (T)^{-3.369} (R)^{-1.429} \quad r = 0.86 \quad \text{Ec. 97}$$

El análisis de las observaciones disponibles muestra, además cierta influencia del clima, la geología y la cobertura vegetal. Asimismo, es posible determinar el coeficiente de agotamiento real mediante aforos sucesivos en el río durante la estación seca; sin embargo, cuando no sea posible ello, se puede recurrir a las

ecuaciones desarrolladas para la determinación del coeficiente “a” para cuatro clases de cuenca:

- **Cuencas con agotamiento muy rápido.** Debido a temperaturas elevadas (>10°C) y retención que va de reducida (50 mm/año) a mediana (80 mm/año):

$$a = -0.00252 (\text{Ln } A) + 0.034 \quad \text{Ec. 98}$$

- **Cuencas con agotamiento rápido.** Retención entre 50 y 80 mm/año y vegetación poco desarrollada (puna):

$$a = -0.00252 (\text{Ln } A) + 0.030 \quad \text{Ec. 99}$$

- **Cuencas con agotamiento mediano.** Retención mediana (80 mm/año) y vegetación mezclada (pastos, bosques y terrenos cultivados):

$$a = -0.00252 (\text{Ln } A) + 0.026 \quad \text{Ec. 100}$$

- **Cuencas con agotamiento reducido,** debido a la alta retención (>100 mm/año) y vegetación mezclada:

$$a = -0.00252 (\text{Ln } A) + 0.023 \quad \text{Ec. 101}$$

Donde a es el coeficiente de agotamiento por día, A es el área de la cuenca en km² EP es la evapotranspiración potencial anual (mm/año), T es la duración de la temporada seca (días) y R es la retención total de la cuenca en mm/año.

h. Almacenamiento hídrico

Se consideran tres tipos de almacenes hídricos naturales que inciden en la retención de la cuenca: acuíferos, lagunas y pantanos y nevados.

La determinación de la lámina “L” que almacena cada tipo de estos almacenes está dado por:

- **Acuíferos**

$$L_A = -750(I) + 315 \quad \text{Ec. 102}$$

Siendo L_A lámina específica de acuíferos (mm/año) e I la pendiente de desagüe (≤15%)

– **Lagunas y pantanos:**

$$L_L = 500 \text{ mm/año}$$

Siendo L_A lámina específica de acuíferos (mm/año)

– **Nevados:**

$$L_N = 500 \text{ mm/año}$$

Siendo L_N la lámina específica de nevados (mm/año)

Las extensiones son determinadas en los mapas, los almacenamientos de corto plazo no son considerados para este caso, estando los mismos incluidos en las ecuaciones de la precipitación efectiva.

i. Abastecimiento de la retención (A_i)

El abastecimiento para la estación lluviosa es uniforme para cuencas ubicadas en la misma región climática. Los coeficientes mensuales expresados en porcentaje del abastecimiento total anual se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27: Almacenamiento hídrico durante la época de lluvias (%)

Región	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Total
Cusco	0	5	35	40	20	0	100
Huancavelica	10	0	35	30	20	5	100
Junín	10	0	25	30	30	5	100
Cajamarca	25	-5	0	20	25	35	110

FUENTE: Plan Meriss II (1980).

La lámina de agua A_i que entra en la reserva de la cuenca se muestra en forma de déficit mensual de la Precipitación Efectiva PE_i . Se calcula mediante la ecuación:

$$A_i = a_i \left(\frac{R}{100} \right) \quad \text{Ec. 103}$$

Donde A_i es el abastecimiento mensual déficit de precipitación efectiva (mm/mes) a_i es el coeficiente de almacenamiento (%) y R es la retención de la cuenca (mm/año).

j. Determinación del caudal mensual para el año promedio (CM_i)

Está basado en la ecuación fundamental que describe el balance hídrico mensual a partir de los componentes descritos anteriormente:

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i \quad \text{Ec. 104}$$

Donde CM_i es el caudal del mes i (mm/mes); PE_i es la precipitación efectiva del mes i (mm/mes); G_i es el gasto de la retención del mes i (mm/mes); A_i es el abastecimiento del mes i (mm/mes).

k. Generación de caudales mensuales para períodos extendidos

A fin de generar una serie sintética de caudales para períodos extendidos, se ha implementado un modelo estocástico que consiste en una combinación de un proceso markoviano de primer orden, que en este caso es la precipitación efectiva en la ecuación:

$$Q_t = f(Q_{t-1}) \quad \text{Ec. 105}$$

$$Q = g(PE_t) \quad \text{Ec. 106}$$

Con la finalidad de aumentar el rango de valores generados y obtener una óptima aproximación a la realidad, se utiliza además una variable aleatoria.

$$Z = z(S)\sqrt{(1 - r^2)} \quad \text{Ec. 107}$$

La ecuación integral para la obtención de caudales medios mensuales es:

$$Q_t = B_1 + B_2(Q_{t-1}) + B_3(PE_t) + z(S)\sqrt{(1 - r^2)} \quad \text{Ec. 108}$$

Donde Q_t es caudal del mes t, Q_{t-1} es caudal del mes anterior, PE_t es la precipitación efectiva del mes y B₁ es un factor constante o caudal básico, z es un número aleatorio con distribución normal estándar que puede ser obtenido del anexo respectivo y S es el error.

Se calculan los parámetros B₁, B₂, B₃, r y S sobre la base de los resultados del modelo para el año promedio por un cálculo de regresión con Q_t como valor dependiente y Q_{t-1} y PE_t como valores independientes.

El proceso de generación requiere de un valor inicial, el cual puede ser obtenido en una de las siguientes formas:

- Empezar el cálculo en el mes para el cual se dispone de aforo.
- Tomar como valor inicial el caudal promedio de cualquier mes.
- Empezar con un caudal cero, calcular un año y tomar el último valor como valor Q_0 sin considerar estos valores en el cálculo de los parámetros estadísticos del período generado.

1. Restricciones del modelo

El modelo presenta ciertas restricciones de uso o aplicación tales como:

- El uso de los modelos parciales, únicamente dentro del rango de calibración establecido.
- Su uso es únicamente para el cálculo de caudales mensuales promedio.
- Los registros generados en el período de secas presentan una mayor confiabilidad que los valores generados para la época lluviosa.
- La aplicación del modelo se restringe a las cuencas en las que se ha calibrado sus parámetros (Cusco, Huancavelica, Junín, Cajamarca).

2.5. MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL - SWAT

El *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) es un modelo hidrológico distribuido, continuo y de paso diario, diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas A&M. Este modelo es de obtención gratuita y disponible en internet desde: <http://swat.tamu.edu/software/swat-executables/> tanto para sistemas operativos Windows y GNU/Linux. SWAT permite simular la generación de escurrimiento y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que tienen las prácticas agronómicas, incluyendo el uso de pesticidas, fertilizantes y derivados biológicos, sobre la calidad del agua de dichas cuencas (Valdivieso y Naranjo 2003). SWAT está definido por 8 componentes: hidrología, clima, erosión y sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de plantas, nutrientes, pesticidas y manejo del suelo. Para propósitos de esta tesis se tendrá en cuenta los componentes de hidrología y clima.

El modelo que integra a la hidrología subterránea, la hidrometeorología y las características físicas de la cuenca es conocido como balance hídrico (BH) (Ruiz *et al.* 2012). El balance hídrico se refiere al cómputo de las entradas y las salidas de agua y energía en una cuenca. La entrada principal es la precipitación y las salidas se refieren a los flujos de agua ocasionados por evapotranspiración, recarga de aguas subterráneas y escurrimiento. El balance puede calcularse para un perfil de suelo, una parcela o una cuenca. El ciclo hidrológico (Figura 10) simulado por el SWAT está basado en la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad \text{Ec. 109}$$

Donde, SW_t es la cantidad final de contenido de agua en el suelo (mm), SW es la cantidad inicial de contenido de agua en el suelo (mm), t es el tiempo en días, R_i es la cantidad de lluvia caída en el período de análisis (mm), Q_i es la cantidad de esorrentía (mm), ET_i evapotranspiración (mm), P_i percolación (mm), QR_i flujo de retorno (mm).

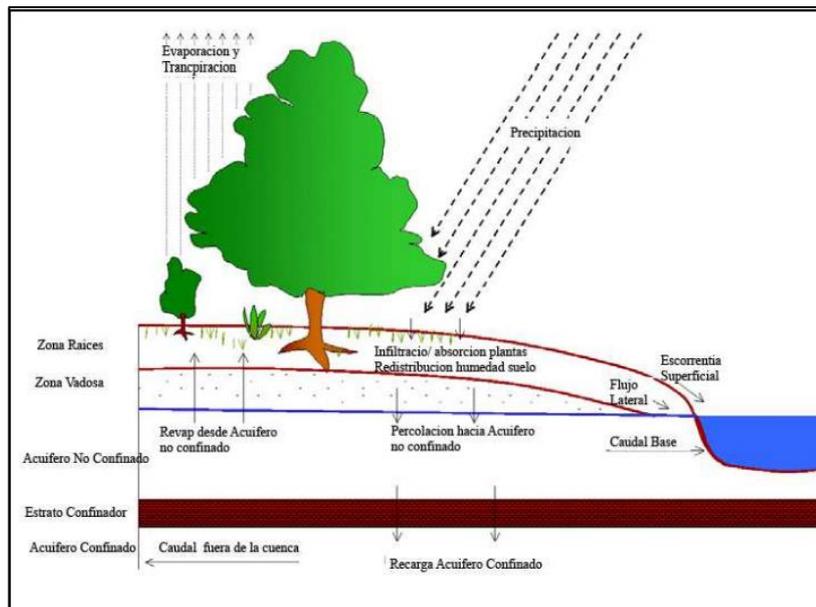


Figura 10: Representación esquemática del ciclo hidrológico

FUENTE: Neitsch *et al.* (2005a).

Este modelo puede ser clasificado como espacialmente semidistribuido, ya que utiliza una aproximación mixta entre raster y vector. La cuenca se divide en sub-cuencas, y la información es organizada para cada sub-cuenca dentro de las siguientes categorías: clima,

unidades de respuesta hidrológica (HRU), embalses, agua subterránea y cauce principal que drena cada sub-cuenca. La hidrología de la cuenca está conceptualmente dividida en: a) procesos en laderas y b) procesos dentro del cauce. La carga de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas hacia el cauce, producida en cualquiera de las sub-cuencas, es controlada por los procesos en las laderas. Los procesos en el cauce determinan después el movimiento del agua, sedimentos y contaminantes desde la red hídrica hacia la salida de la cuenca. Para la modelación hidrológica, el modelo utiliza típicamente una escala de tiempo diaria. Esto hace que la aplicación de dicho modelo sea especialmente interesante en áreas donde no se cuenta con datos meteorológicos sub-diarios. La respuesta puede ser obtenida desde una escala temporal diaria hasta una anual, según los requerimientos del usuario. La unidad espacial en la cual ocurren los cálculos son las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs). Éstas se asumen homogéneas con respecto a sus propiedades hidrológicas (Neitsch *et al.* 2005a) y son derivadas semiautomáticamente por el modelo, a partir de una base de datos espacial con el uso de suelo, tipo de suelo, modelo de elevación digital y ciertos criterios definidos por el usuario. La hidrología de la cuenca es conceptualmente dividida en dos etapas mayores: (a) etapa terrestre del ciclo hidrológico y (b) etapa de transporte. La contribución de caudal en el cauce principal de cada sub-cuenca es controlado por la fase terrestre. La etapa de transporte después determina el movimiento del agua a través de la red de canales hasta los puntos internos de control (estaciones de medición de caudales) y hasta la salida de la cuenca.

2.5.1. Ventajas de utilizar el modelo SWAT

Las principales ventajas para utilizar el modelo SWAT son:

- Es una herramienta disponible gratuitamente desde la internet, que puede ser utilizada con programas de Sistemas de Información Geográfica como ArcGis y/o QGis indistintamente.
- La existencia de manuales disponibles a los usuarios desde la internet y su interfase gráfica, hacen al modelo SWAT muy atractivo para ser usado por agencias de gobierno y tomadores de decisiones del recurso hídrico.
- El SWAT modela las cuencas, hidrológicamente primero y luego esta modelación se puede extender a calidad de agua y transporte de sedimentos.
- Numerosos grupos de investigación a nivel mundial lo están utilizando, lo que contribuye al desarrollo y perfeccionamiento del modelo.

- SWAT ofrece distintos métodos para el cálculo de la evapotranspiración potencial y la escorrentía superficial, cada uno con distintos requerimientos en cuanto a la cantidad de datos, lo cual le otorga flexibilidad de acuerdo con la cantidad de datos disponibles.

2.5.2. Componentes del modelo SWAT

2.5.2.1. Unidad de Respuesta Hidrológica (H.R.U.)

Las unidades de respuesta hidrológica (HRUs) son áreas de una cuenca que son homogéneas en términos de su respuesta hidrológica y características geo-climáticas. Un HRU está conformada usualmente por áreas dispersas, desconectadas entre sí, pero que mantienen propiedades comunes de especial importancia hidrológica, como son: pendiente (que determina la velocidad de la escorrentía superficial), elevación (pues el volumen de precipitación varía con la altura), aspecto (especialmente en cuencas con nieve), tipo de suelo, cubierta vegetal, usos de suelo, etc. No todas las propiedades mencionadas se utilizan en la definición de HRUs: depende del criterio del modelador definir cuáles son las “propiedades dominantes” que se utilizarán en la definición.

2.5.2.2. Escorrentía superficial - Método Curva Número (CN)

La escorrentía en la superficie o flujo terrestre, es el flujo que ocurre a lo largo de una superficie inclinada. El SWAT simula volúmenes de superficie de escorrentía y promedios máximos de escorrentía para cada HRU, utilizando las cantidades diarias o sub-diarias de lluvia. La cantidad de escorrentía es estimada aplicando la metodología del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos, con datos de lluvia diarios.

Para determinar el volumen de escurrimiento, debe hacerse una estimación del valor de CN, el cual depende de características de la cuenca tales como uso de la tierra, condiciones del suelo y condiciones de humedad de la cuenca en el momento de ocurrir la precipitación, como se explica a detalle líneas arriba.

2.5.2.3. Infiltración

La infiltración se refiere a la entrada de agua en un perfil de suelo de la superficie terrestre. Cuando la infiltración continúa, el suelo se humedece cada vez más lo cual origina que el promedio de infiltración disminuya con el tiempo hasta que alcance un valor constante. La tasa inicial de infiltración depende del contenido de humedad del suelo antes de la introducción de agua en la superficie terrestre. La tasa final de infiltración equivale a la conductividad hidráulica saturada del suelo. La cantidad de agua que entra el perfil de suelo se calcula como la diferencia entre la cantidad de lluvia y la cantidad de escorrentía de superficie. El método de infiltración Green & Ampt, modela directamente la infiltración, pero requiere los datos de precipitación en incrementos más pequeños de tiempo (Fernández 2017).

El agua que penetra en el suelo (infiltración) puede tomar varios caminos: incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse sub-superficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos y acuíferos profundos. El SWAT considera flujo lateral, percolación y flujo de rETorno (Valdivieso y Naranjo 2003).

2.5.2.4. Clima

El clima de una cuenca provee los inputs de humedad y energía que controlan el balance hídrico y determina la importancia relativa de los distintos componentes ciclo hidrológico. Las variables climáticas utilizadas por SWAT son precipitación diaria, temperatura máxima/mínima del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Siendo los requerimientos mínimos, dependiendo del método utilizado para obtener la evapotranspiración y escorrentía superficial, precipitación diaria, temperatura máxima/mínima. Los inputs utilizados pueden ser series de datos observadas o generados durante la simulación por el generador climático incorporado.

2.5.2.5. Bandas de elevación

Para representar la variación orográfica de las precipitaciones y las temperaturas SWAT permite definir hasta 10 bandas de elevación por cada sub-cuenca. Para cada banda de elevación se calcula la precipitación, temperatura máxima y mínima como una función de una tasa de variación (plaps y tlaps) y la diferencia entre la elevación de la estación y la elevación promedio de la banda. Los únicos procesos que se modelan separadamente para

cada banda son la acumulación, sublimación y derretimiento de la nieve; una vez obtenidos dichos valores para la banda, se estima el valor de dentro de la sub-cuenca de la misma manera que para las precipitaciones y temperaturas.

2.5.2.6. Cobertura Nival

SWAT clasifica las precipitaciones como lluvia o nieve utilizando la temperatura promedio diaria. La temperatura umbral utilizada para categorizar la precipitación como nieve o lluvia es definida por el usuario: si la temperatura promedio diaria es menor a esta temperatura umbral, entonces las precipitaciones dentro de la HRU son clasificadas como nieve y se suma como equivalente de agua a la cantidad de nieve existente.

2.5.2.7. Hidrología

La precipitación puede ser interceptada por la vegetación, o caer sobre el suelo. El agua sobre el suelo se infiltrará dentro de él o escurrirá sobre como escorrentía superficial. La escorrentía se mueve relativamente rápido hasta un cauce y contribuye a la repuesta rápida del caudal en el río. El agua infiltrada por otro lado puede ser almacenada en el suelo y después evapotranspirada o ir lentamente a través del agua subterránea hacia el sistema de agua superficial.

2.5.2.8. Evapotranspiración

La evapotranspiración es un término que define todos los procesos en el que agua en fase líquida y sólida se convierte en vapor atmosférico. La evapotranspiración incluye evaporación de ríos y lagos, suelo descubierto, y superficies vegetativas, transpiración desde las hojas de las plantas y la sublimación desde superficies de hielo y nieve. El modelo automatiza la evaporación de suelos y plantas separadamente. La evaporación verdadera del agua en el suelo se estima utilizando funciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua. La transpiración de la planta se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área foliar de las hojas.

2.5.2.9. Evapotranspiración potencial

SWAT da la posibilidad de modelar la evapotranspiración utilizando una de las siguientes fórmulas empíricas: Penman-Monteith, Priestly-Taylor o Hargreaves. La fórmula de

Penman-Monteith proporciona una mejor descripción del proceso, pero necesita de muchos datos de entrada (radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento), alguno de los cuales son difíciles de obtener para grandes cuencas. Las fórmulas de Priestly-Taylor o Hargreaves tienen la ventaja de requerir menos datos de entrada, sin embargo, bajo una condición mínima de disponibilidad de datos, Hargreaves puede ser utilizado con series de temperatura como único dato de entrada. La fórmula por defecto que utiliza el SWAT es la fórmula de Hargreaves.

2.5.2.10. Redistribución

La redistribución se refiere al movimiento continuo de agua por el perfil del suelo después de la entrada del agua (por precipitación o irrigación). La redistribución es causada por diferencias en el contenido de agua dentro del perfil: cuando el contenido de agua a través del perfil total es uniforme, la redistribución finaliza. El componente de la redistribución de SWAT usa un almacenamiento que dirige la técnica para predecir el flujo por cada capa de suelo en la zona principal. El flujo hacia abajo, ocurre cuando la capacidad de espacio de una capa de suelo es excedida y la capa por debajo no está saturada. La tasa del flujo es gobernada por la conductividad saturada de la capa de suelo (conductividad hidráulica). La redistribución es afectada por la temperatura del suelo. Si la temperatura en una capa particular es de 0 °C o debajo, ninguna redistribución es permitida.

2.5.2.11. Percolación

El componente de percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa de suelo en la zona de raíces. El flujo hacia abajo se presenta cuando se excede la capacidad de campo (CC) de una capa de suelo y cuando la capa inferior no está saturada. La tasa de flujo hacia abajo está gobernada por la conductividad a saturación en la capa del suelo. El flujo hacia arriba puede ocurrir cuando una capa inferior excede la CC. El movimiento de agua de una capa inferior hacia una capa inferior adyacente es regulado por el coeficiente de agua del suelo CC de las dos capas.

2.5.2.12. Flujo lateral subsuperficial

El flujo lateral o inter-flujo subterráneo lateral, es una contribución de la corriente de flujo que se origina debajo de la superficie, pero por encima de la zona donde el suelo está saturado con agua. El flujo subterráneo lateral en el perfil de suelo (0-2m) se calcula simultáneamente

con redistribución. Un modelo cinemático del almacenamiento se utiliza para predecir el flujo lateral en cada capa de suelo.

2.5.2.13. Flujo base (flujo de retorno)

El flujo base, es el volumen de agua subterránea originado en el manto freático. El SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: un acuífero superficial y libre, que contribuye al flujo de regreso a las corrientes dentro de la cuenca hidrográfica y un acuífero profundo y limitado que contribuye al flujo de retorno a las corrientes fuera de la cuenca Fernández (2017) citando a Arnold *et al.* (2012). El agua que filtra más allá del fondo de la zona de raíz se divide en dos fracciones, cada fracción se convierte en recarga para cada uno de los acuíferos. Además de retornar al flujo, el agua almacenada en el acuífero superficial puede abastecer de nuevo humedad en el perfil del suelo en condiciones muy secas o es absorbido directamente por la planta. Una constante de recesión derivada a partir de datos diarios de flujo se usa para retardar el flujo del acuífero a la corriente de agua.

2.6. MODELAMIENTO CLIMÁTICO

2.6.1. Cambio climático

El clima varía con el tiempo bajo la influencia de mecanismos internos propios tales como El Niño/Oscilación del Sur y de factores externos conocidos como “forzamientos radiativos” naturales. Entre los forzamientos externos naturales más importantes se encuentran las variaciones de la actividad solar, los movimientos planetarios, las erupciones volcánicas y los cambios en la composición de la atmósfera. Recientemente, los científicos han determinado que las actividades humanas, específicamente el aumento en las concentraciones de GEI en la atmósfera, se han convertido en un forzamiento externo dominante sobre el clima; de hecho, este es el responsable de la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años. Este fenómeno es lo que se conoce popularmente como “calentamiento global” o, más ampliamente al incluir otros efectos, como “cambio climático” (Cifuentes 2010).

Para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2007), el término “cambio climático” es definido como “un cambio en el estado del clima, por

ejemplo, mediante análisis estadísticos, a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos”. Del mismo modo, para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2013), el cambio climático es entendido a partir del “concepto de forzamiento radiativo que es útil para comparar la influencia en la temperatura media global en superficie de la mayor parte de los agentes individuales que más afectan al equilibrio radiactivo de la Tierra”.

La definición de cambio climático del IPCC no distingue entre las causas naturales o antropogénicas del cambio. En cambio, el Artículo 1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en el 1992, lo describe como “un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada”.

2.6.2. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC

El IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) es un organismo creado en el sistema de Naciones Unidas que elabora informes para apoyar a los diferentes gobiernos en materias relacionadas con el Cambio Climático, sus impactos y las medidas de adaptación y mitigación que deben adoptarse. La participación de los países en el IPCC es voluntaria y está abierta a todos los miembros de la Organización Meteorológica Mundial- OMM y las Naciones Unidas. Actualmente cuenta con 195 países. Se estructura a partir del Grupo de Expertos, formado por representantes de los Estados Miembros que adopta las decisiones más importantes. Está asesorado por la Mesa del IPCC, elegida por los gobiernos de los Estados Miembros, que apoya al Grupo en los aspectos científicos y técnicos de su labor y en cuestiones de gestión y estrategia. Los informes son realizados por centenares de científicos que participan de manera voluntaria y altruista. Sus contribuciones pueden ser de diferente nivel: como autores y coordinadores principales, autores principales, autores contribuyentes y revisores (García 2016). Los resultados de los análisis son publicados en informes de evaluación denominados por sus siglas en inglés AR (*Assessment Report*). A continuación, el detalle de los reportes generados por el IPCC a la fecha:

- Primer reporte de evaluación (FAR): 1990.
- Segundo reporte de evaluación (SAR): 1995 (base para el protocolo de Kyoto).

- Tercer reporte de evaluación (TAR): 2001.
- Cuarto reporte de evaluación (AR4): 2007.
- Quinto reporte de evaluación (AR5): 2013-2014.

El IPCC se encuentra ahora en su sexto ciclo de evaluación, en el que el IPCC está produciendo el Sexto Informe de Evaluación (AR6) con contribuciones de sus tres Grupos de Trabajo y un Informe de Síntesis, tres Informes Especiales y un refinamiento de su último Informe Metodológico. El Informe de síntesis será el último de los productos AR6, que se lanzará en 2022.

En la Figura 11, podemos ver la cronología y/o líneas de tiempo de los documentos y reportes generados por el IPCC a la fecha.

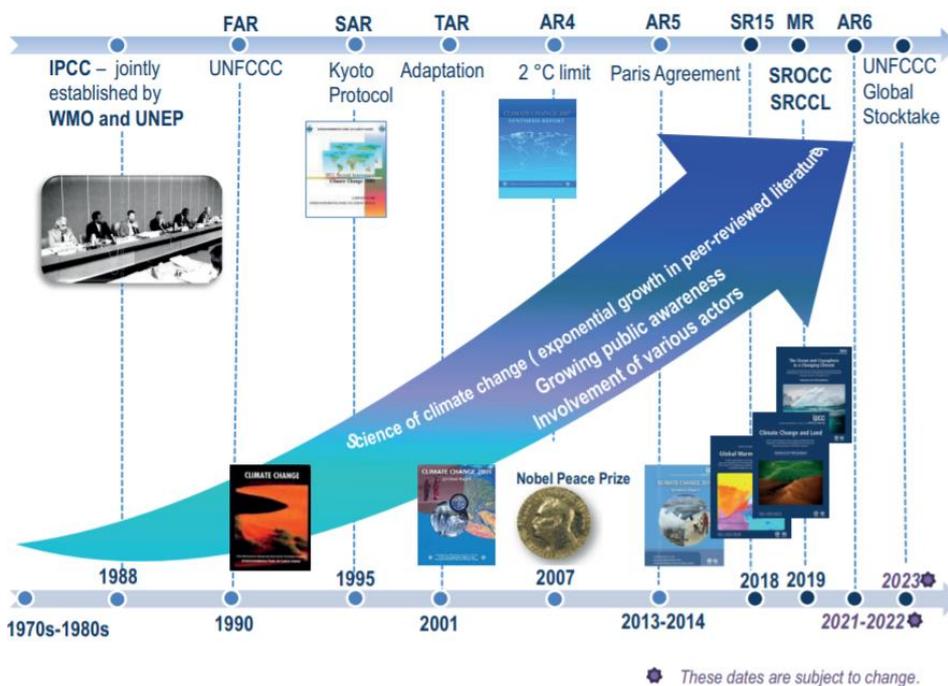


Figura 11: Contribución del IPCC a la ciencia climática y la formulación de políticas

FUENTE: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/05/2020-AC6_en.pdf

2.6.3. Modelos climáticos globales

También llamados MCG, son modelos numéricos que representan los procesos físicos de la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre. Consideradas como las herramientas más avanzadas, actualmente disponibles para simular la respuesta del sistema

climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Los modelos climáticos serán fidedignos solo en la medida en que sean capaces de proporcionar simulaciones de los patrones de circulación a gran escala y de las variables climáticas a un nivel diario, anual, estacional, entre otros (Avalos *et al.* 2013).

El IPCC distingue tres tipos de escenarios climáticos: escenarios incrementales o sintéticos, escenarios análogos y escenarios basados en los Modelos Climáticos Globales (MCG), y son los escenarios basados en los modelos climáticos los que en la actualidad están experimentando un mayor desarrollo debido a que incorporan los forzamientos de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sistema climático, por tanto, estos modelos requieren como entrada los escenarios futuros de emisiones de GEI los que a su vez se basan en modelos socio-económicos globales. Por otro lado, Oviedo & León (2010) mencionan que los modelos climáticos globales suelen ofrecer información a escalas superiores a los 2.5°, que difícilmente puede ser aplicada de manera directa a una región o lugar concreto, por lo que, se hace necesario producir información más aproximada a las condiciones climáticas reales de esa región o lugar, lo cual conlleva a reducir de escala dichos resultados. La representación de un MCG se visualiza en la Figura 12.

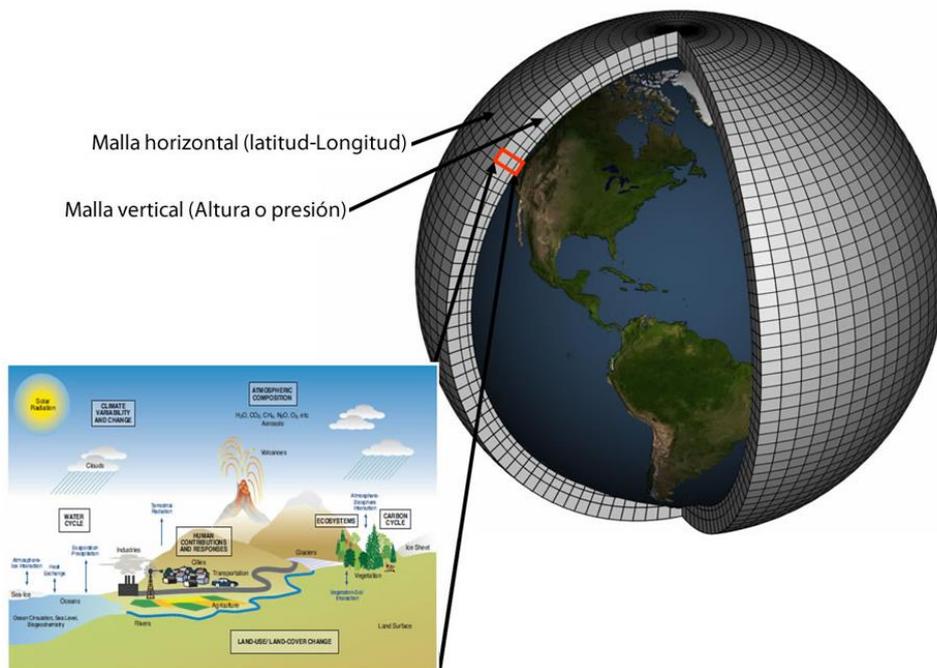


Figura 12: Esquema de un Modelo Climático Global

FUENTE: https://gfdl.noaa.gov/pix/model_development/climate_modeling/climate_model.png

2.6.4. Escenarios de emisiones de CO₂ del IPCC

Los escenarios de cambio climático se construyen con base en las estimaciones climáticas realizadas con los Modelos Climáticos Globales que hacen uso de ecuaciones matemáticas para describir el comportamiento de los factores que impactan el clima. El Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones exploran alternativas de desarrollo. Estas alternativas incorporan factores demográficos, sociales, económicos, tecnológicos y ambientales, junto con las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes, para conjeturar el cambio climático a futuro. La lógica principal detrás de estos escenarios es que las sociedades tienen la opción de colaborar para solucionar los problemas globales mediante soluciones conjuntas y comprensivas, o pueden permanecer aisladas e intentar solucionar sus problemas de manera independiente. Asimismo, los objetivos de desarrollo pueden orientarse hacia el aumento de la riqueza humana o hacia la conservación del medio ambiente (Cifuentes 2010).

En el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2007) se utiliza un conjunto de trayectorias de concentración representativas (RCP) que sustituye en gran medida a los escenarios del Informe especial del IPCC sobre escenarios de emisiones. Estos producen una serie de respuestas que van desde el actual proceso de calentamiento, pasando por un forzamiento aproximadamente estabilizado, hasta un escenario de mitigación exigente (RCP2.6) que estabiliza y posteriormente reduce lentamente el forzamiento radiativo después de la mitad del siglo XXI (IPCC 2013). Las medidas de mitigación aplicadas de forma inmediata a los escenarios RCP no producen unos resultados discernibles relativos al cambio climático durante los próximos 30 años aproximadamente, mientras que los efectos a largo plazo del cambio climático después de mediados de siglo muestran una diferencia apreciable en las RCP.

En el informe del IPCC 2013, se han definido 4 nuevos escenarios de emisión, las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), los cuales se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total, para el año 2100, entre 2,6 y 8,5 W/m².

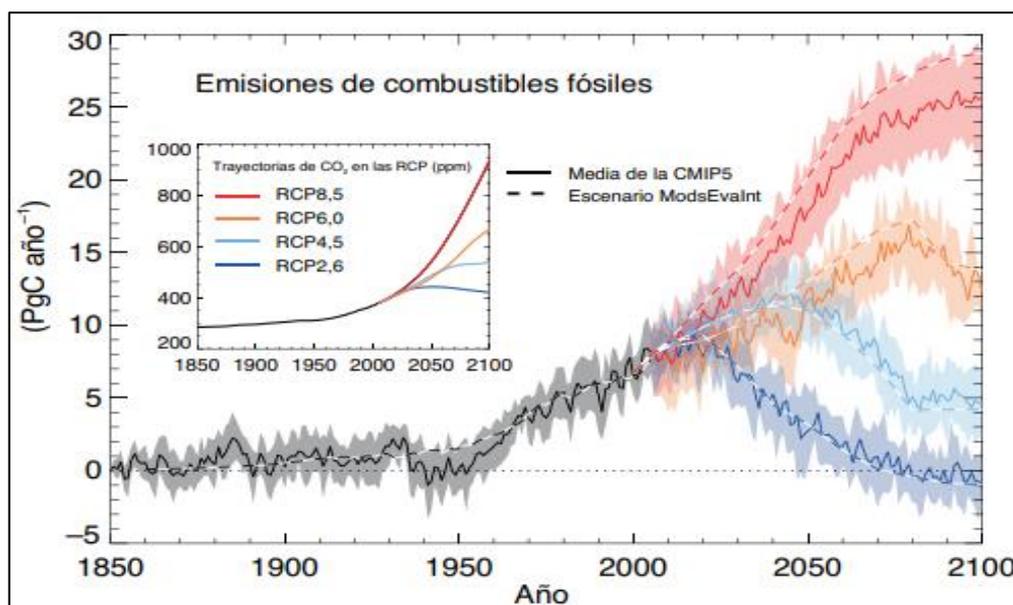


Figura 13: Emisiones de combustibles fósiles en los escenarios RCP

FUENTE: IPCC (2013).

Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de Gas de Efecto de Invernadero (GEI), el RCP 8.5. La Tabla 28 muestra las tendencias del forzamiento radiativo bajo diferentes RCP.

Tabla 28: Tendencia de forzamiento radiativo bajo diferentes RCP

Nombre	FR al 2100	Tendencia del FR	(CO ₂) al 2100
RCP2.6	2.6 W/m ²	Decreciente en 2100	421ppm
RCP4.5	4.5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6.0 W/m ²	creciente	670 ppm
RCP8.5	8.5 W/m ²	creciente	936 ppm

FUENTE: IPCC (2013).

Los escenarios climáticos para la zona de estudio se basan en el escenario de emisiones RCP8.5, desarrollado por el IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) de Austria, el cual supone la combinación de un alto crecimiento poblacional, un bajo crecimiento de PBI, modestas tasas de cambios tecnológicos y poca eficiencia energética, llevando a grandes demandas energéticas y el incremento de gases de efecto invernadero (Riahi *et al.* 2011).

2.6.5. Simulaciones de los modelos del IPCC

En el marco del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP), el Grupo de Trabajo sobre Modelado Acoplado (WGCM) estableció el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) como un protocolo experimental estándar para estudiar el resultado de los modelos acoplados de circulación general atmósfera-océano (AOGCM). CMIP proporciona una infraestructura comunitaria que respalda el diagnóstico, la validación, la intercomparación, la documentación y el acceso a los datos del modelo climático. Este marco permite a una comunidad diversa de científicos analizar los GCM de forma sistemática, un proceso que sirve para facilitar la mejora del modelo. Prácticamente toda la comunidad internacional de modelos climáticos ha participado en este proyecto desde su inicio en 1995. El Programa de Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos (PCMDI) archiva gran parte de los datos de CMIP y proporciona otro soporte para CMIP. El esfuerzo CMIP de PCMDI está financiado por el Programa de Modelado del Clima Regional y Global (RGCM) de la División de Ciencias Ambientales y Climáticas del programa de la Oficina de Investigación Científica, Biológica y Ambiental (BER) del Departamento de Energía de EE. UU.

Los modelos de circulación general acoplados atmósfera-océano permiten que el clima simulado se ajuste a los cambios en el forzamiento climático, como el aumento del dióxido de carbono atmosférico. CMIP comenzó en 1995 recolectando resultados de modelos de "corridas de control" en las que el forzamiento climático se mantiene constante. Las versiones posteriores del CMIP han recopilado la producción de un escenario idealizado de calentamiento global, con el CO₂ atmosférico aumentando a una tasa del 1% por año hasta que se duplica aproximadamente en el año 70. La producción del CMIP está disponible para su estudio por subproyectos de diagnóstico aprobados.

2.6.6. Métodos de *Downscaling*

Cuando se necesita trabajar con escalas pequeñas, los MCGs no son capaces de simular efectivamente las características climáticas de determinado sitio a menor escala, por ejemplo, al no representar la topografía local, la cual influencia notablemente en el clima de una zona. Por lo tanto, una reducción de la escala de los modelos de circulación global sería necesaria. Se conoce que los métodos de *downscaling* son dos, el método de reducción de escala dinámica y el método de reducción de escala estadística o empírica.

a. Reducción de escala dinámica

El método de reducción de escala dinámica permite a partir de los MCGs obtener información con una resolución alta del clima. *Downscaling* dinámico se basa en procesos físicos, éste resuelve ecuaciones diferenciales que representan tales procesos a partir de un MCG que aporta condiciones iniciales y de contorno (Ochoa-Sánchez 2013).

b. Reducción de escala estadística

Según Fiseha *et al.* (2012) el *downscaling* estadístico se basa en el desarrollo de relaciones cuantitativas de variables locales de superficie (predictandos) y variables atmosféricas a gran escala (predictores). Esta relación se puede representar con la siguiente ecuación: $R = F(X)$, donde R es el Predictando (Precipitación, temperatura); F es la función determinística o estocástica que relaciona a predictando y predictor (Lineal o no lineal); X es el Predictor (presión atmosférica a nivel del mar, humedad específica, etc.).

Las técnicas de *downscaling* estadístico se agrupan en tres grupos principales: generadores de clima, esquemas de tipificación de clima y modelos de regresión. Las técnicas estadísticas de *downscaling* se basan en hipótesis establecidas donde las relaciones lineales y no lineales cuantitativas entre predictores (de gran escala) y predictandos (de escala local) son invariables frente al cambio climático. Esta técnica por lo general demanda menor tiempo computacional; aunque los métodos no lineales desarrollados recientemente se basan en complejos algoritmos de optimización no lineal y requieren un mayor tiempo de procesamiento (Fiseha *et al.* 2012).

2.7. CAMBIO CLIMÁTICO Y TENDENCIAS DEL CLIMA EN LA REGIÓN JUNÍN

La región central del Perú, es considerada el área del país con mayor vulnerabilidad frente al Cambio Climático por la ubicación geográfica, especialmente el valle del Mantaro. Esta región es importante porque es el principal abastecedor de alimentos de Lima y precisamente uno de los efectos del cambio climático se reflejará en la seguridad alimentaria, asociado a la escasez de agua (Salazar 2016).

Actualmente la población de la cuenca del río Mantaro es vulnerable a diversos eventos meteorológicos y geodinámicas, los mismos que se prevé serían exacerbados por el cambio climático. Los principales peligros que se presentan son las heladas, sequías y los fenómenos geodinámicos externos, tales como deslizamientos, huaycos, erosión de suelos y sedimentación de ríos. Las heladas son frecuentes en las partes altas de la cuenca, donde la exposición a la intemperie es mayor (IGP 2010).

Las proyecciones de los modelos para fines de Siglo XXI en los Andes Tropicales indican un calentamiento sostenido de la tropopausa tropical (Vuille 2007). Según el escenario de emisiones A2, los Andes podrían experimentar un masivo calentamiento del orden de 4,5-5,0 °C para finales de siglo. Tanto escenarios optimistas como pesimistas proyectan un mismo patrón de calentamiento, sólo difiere la amplitud del rango (Avalos *et al.* 2010).

En general, en relación con la variabilidad interna natural, se espera que los aumentos a corto plazo en media temporada y las temperaturas medias anuales serán mayores en zonas tropicales y subtropicales que en las latitudes medias (IPCC 2013). Así mismo se prevé aumentos de precipitación media anual en altas latitudes y el Océano Pacífico ecuatorial, mientras que en muchas latitudes medias y regiones subtropicales secas, las precipitaciones probablemente disminuirán significativamente, también indican que en regiones húmedas de latitud media, la precipitación media es probable que aumente a finales del siglo XXI en el escenario de altas emisiones RCP8.5, por tanto los eventos extremos de precipitación en mayor parte de las masas terrestres de latitudes medias y más de las regiones tropicales húmedas es muy probable que sean más intensos y más frecuentes a finales de este siglo (IPCC 2013).

2.8. BASE DE DATOS PISCO

Con propósitos de obtención de datos de un período largo, de más de 30 años, se ha creído por conveniente descargar los datos de precipitación diaria, temperatura máxima y temperatura mínima diaria de la base de datos PISCO del SENAMHI.

El SENAMHI desde el 2013 y a través de su Dirección de Hidrología, ha generado la base de datos PISCO - *Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and*

hydrological Observations, la cual es una base de datos hidroclimáticos a una escala espacial de aproximadamente 5 km, con un área de influencia de todo el país, disponible para descargarse desde la página web del SENAMHI en formato NETCDF, con información desde enero de 1981 a diciembre de 2016 (Aybar *et al.*, 2017; citados por Ccori 2019).

El producto PISCO fue generado en el marco de la Meta de Desarrollo de Investigación Aplicada para la Gestión del Riesgo de Desastres – PREVAED, que ejecuta la Dirección de Hidrología del SENAMHI. Una de las aplicaciones de PISCOp es la calibración de modelos hidrológicos para el pronóstico de caudales de corto plazo. Con PISCOp se ha superado las limitaciones que se tenía en el uso de modelos matemáticos a escala diaria por la escasez de datos diarios de precipitación en muchas cuencas del país. Ello ha permitido calibrar un mayor número de cuencas para los fines operacionales del pronóstico diario de caudales usando diferentes modelos hidrológicos (Aybar *et al.* 2017)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

Las cuencas de los ríos Anya y Mchique se encuentran ubicadas políticamente entre las provincias de Concepción, Huancayo y Jauja, en el departamento de Junín, en la sierra del Perú. Geográficamente, la cuenca del río Anya se sitúa en la margen izquierda del río Mantaro, entre los paralelos 11.89° y 11.98° de latitud Sur y los meridianos 75.21° y 75.28° longitud Oeste. Asimismo, la cuenca del río Mchique se ubica en la margen derecha del río Mantaro, entre los paralelos 11.86° y 11.97° latitud Sur y los meridianos 75.385° y 75.445° longitud Oeste. Las Figuras 14 y 15 muestran el mapa de ubicación de ambas cuencas, las cuales vierten sus aguas de escorrentía en el río Mantaro. La Tabla 29 contiene la extensión de las cuencas en coordenadas geográficas y UTM respectivamente.

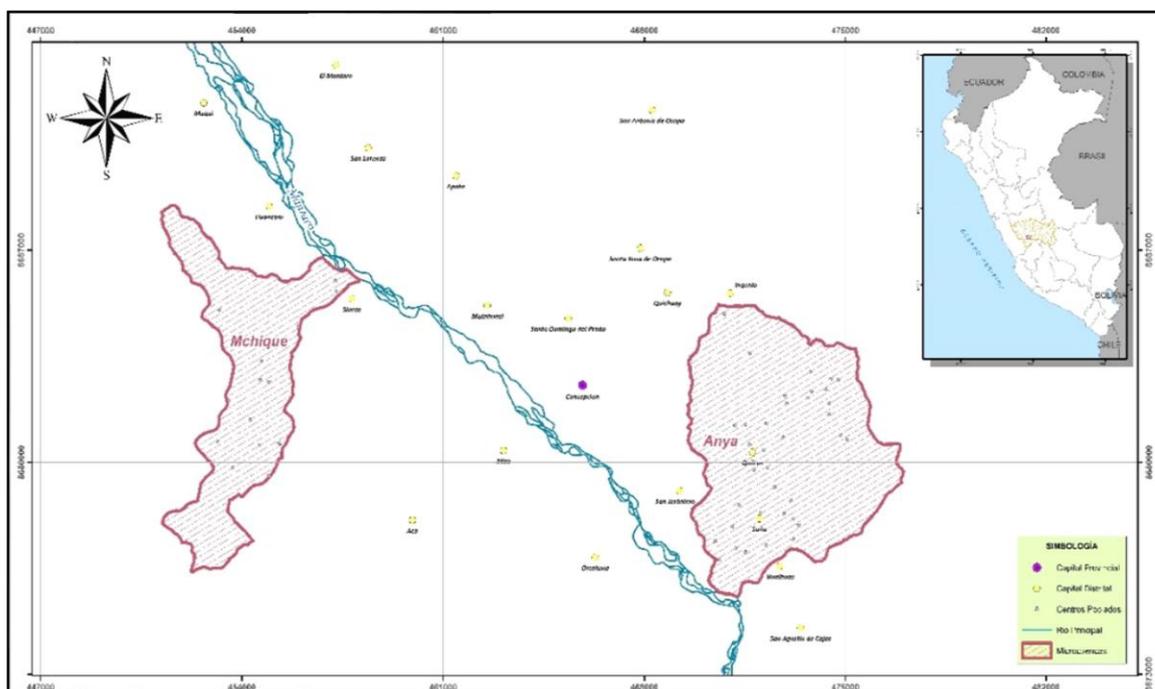


Figura 14: Ubicación política de las microcuencas Anya y Mchique

Tabla 29: Rango de coordenadas geográficas y UTM de las cuencas

Cuenca	Coordenadas geográficas		Coordenadas UTM	
	Latitud Sur (°)	Longitud Oeste (°)	Este	Norte
Anya	11.89 - 11.98	75.21 - 75.28	470614.89- 471309.43	8675565.54- 8679601.90
Mchique	11.86 - 11.97	75.385 - 75.445	451531.79- 452259.39	8685917.38- 8688464.00

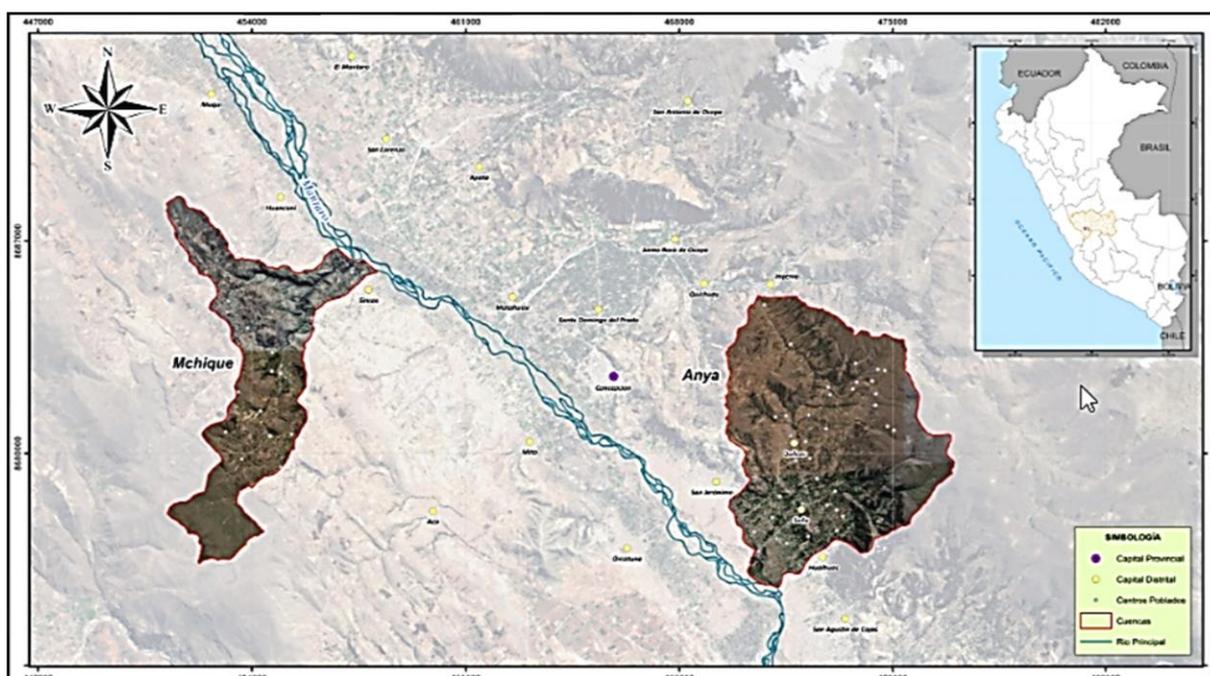


Figura 15: Imagen satelital de las cuencas de estudio

FUENTE: Google Earth (2019).

3.2. INFORMACIÓN SIG Y CARTOGRÁFICA UTILIZADA

Se recopiló información de distintas instituciones gubernamentales (Tabla 30), simultáneamente se procedió a la revisión de las bases de datos descargadas, con la finalidad de homogenizar formatos y definir sistemas de coordenadas, apoyándonos en las funcionalidades de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Tabla 30: Fuentes de información cartográfica utilizada en la investigación

N°	Mapa	Institución	Año	Escala
1	Carta Nacional 24-m (Jauja)	Instituto Geográfico Nacional- IGN	1990	1: 100 000
2	Unidades Hidrográficas	Autoridad Nacional del Agua - ANA	2009	1: 100 000
3	Ríos	Autoridad Nacional del Agua - ANA	2016	1: 100 000
4	Redes Viales	Ministerio de Transportes y Comunicaciones- MTC	2016	1: 100 000
5	ZEE	Ministerio del Ambiente - MINAM y Gobierno Regional de Junín- GRJ	2015	1: 100 000
6	MAPS	Ministerio de Cultura	2016	1: 100 000
7	DEM	NASA	2011	

Con motivo de comparación de imágenes satelitales que visualicen la zona de estudio que sean actuales, se descargaron imágenes desde el satélite Rapideye y Sentinel 2B del año 2015 y 2018 respectivamente. Sin embargo, para el análisis de la cobertura vegetal actualizada, fue necesario comprar imágenes satelitales desde PlanetScope (Planetascopio) con fecha setiembre – octubre de 2019, mejorándose la resolución a 3 m. A continuación, se detallan los satélites utilizados y sus principales características:

Satélite Rapideye

En el caso de las imágenes de Rapideye, se generó un mosaico con varias imágenes para abarcar toda el área de estudio. Las fechas de toma de imágenes fue entre julio y agosto de 2015 y el detalle de imágenes es el siguiente:

- 1833512_2014-08-23_RE5_3A_310362
- 1833513_2015-07-10_RE2_3A_310362
- 1833514_2015-07-10_RE2_3A_310362
- 1833612_2015-07-08_RE5_3A_310362
- 1833613_2015-07-10_RE2_3A_310362
- 1833614_2015-07-10_RE2_3A_310362

Características principales de la imagen

- Tipo de Orbita : Polar Heliosíncrona

- Altura del satélite : 630 km
- Cobertura : 25 km
- Resolución Espacial : 5 m
- Numero de bandas : 5 bandas
- Resolución Temporal : diario

Satélite Sentinel 2B

En el caso de Sentinel el descriptor de la imagen fue: S2B_MSIL1C_20180829T151659_N0206_R125_T18LVM_20180829T215107 y no fue necesario la descarga de más de una imagen porque la cobertura de sólo una, cubre toda la zona de estudio.

Características principales de la imagen

- Tipo de órbita : Polar Heliosíncrona
- Altura : 786 km
- Cobertura : 290 km
- Resolución Espacial : 10 m, en la banda visible e infrarrojo
- Numero de bandas : 13 bandas
- Resolución Temporal : 5 días

Satélite SkySat-C

El satélite de generación SkySat-C es un satélite de imágenes de la Tierra de alta resolución, lanzado por primera vez en 2016. Catorce se encuentran actualmente en órbita y todos recopilan miles de kilómetros cuadrados de imágenes. Cada satélite es ágil y estabilizado en 3 ejes lo suficiente como para variar entre diferentes objetivos de interés. Cada satélite tiene cuatro propulsores para el control orbital, junto con con cuatro ruedas de reacción y tres torsosres magnéticos para control de actitud.

Características principales de la imagen Planetscope:

- Altura : 400 km
- Ancho de franja : 24.6 km x 16.4 km (a 475 km de altura)
- Resolución Espacial : 3 m

- Numero de bandas : 4 bandas (RGB, NIR)
- Formato de archivo : GeoTIFF

La factura, producto de la compra de las imágenes satelitales se muestra en el anexo.

3.3. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

La información meteorológica a escala diaria fue proporcionada por los operadores del proyecto VLIR recolectada durante diciembre de 2013 a marzo de 2015, también se descargó información pluviométrica de la página del SENAMHI correspondiente al año 2014, además se ha utilizado la información de la base de datos PISCO del SENAMHI, realizándose el procedimiento de *downscaling* para el área de estudio con el lenguaje de programación R. Asimismo, se utilizó los datos de lluvia y caudales diarios trabajados por Camones (2015) en su tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola de la UNALM, denominada “Influencia de la Humedad del Suelo en la relación Precipitación -Escorrentía en las cuencas del Anya y Mchique, Junín- Perú”; cabe resaltar, que los datos de precipitación diaria fueron completos y consistentes. Para la generación de escorrentía en condiciones de cambio climático se descargaron y utilizaron los datos de los modelos climáticos globales desde la página del *Climate Explorer*, que se describe a detalle en el capítulo 3.9.

La Tabla 31 contiene la ubicación de las estaciones situadas dentro y en los alrededores de las cuencas de los ríos Anya y Mchque cuyos datos fueron utilizados en la realización de la presente investigación.

Tabla 31: Ubicación (UTM) y tipo de estaciones utilizadas en el estudio

Estación	Tipo	Este	Norte	Altura (msnm)	Fuente
Quilcas	Meteorológica	471689.27	8681173.53	3355	VLIR
Colpar	Pluviométrica	472777.10	8682280.30	3540	VLIR
Tambo	Pluviométrica	474955.00	8682282.20	4097	VLIR
Cruzpampa	Meteorológica	453176.43	8682256.29	3894	VLIR
Chacrapma	Meteorológica	456440.05	8684472.77	3619	VLIR
Sincos	Pluviométrica	458616.60	8685581.60	3309	VLIR
Ingenio	Meteorológica	469504.82	8687806.12	3390	SENAMHI
Jauja	Meteorológica	446956.04	8696991.32	3378	SENAMHI

«continuación»

Acopalca	Meteorológica	487344.00	8681476.98	3839	SENAMHI
Huayao	Meteorológica	463204.31	8669188.21	3360	SENAMHI
Santa Ana	Pluviométrica	476406.60	8672976.30	3295	SENAMHI
Anya	Hidrométrica	471691.34	8678961.96	3279	VLIR
Mchique	Hidrométrica	456438.46	8685578.57	3350	VLIR

La Figura 16 muestra la ubicación de las estaciones pluviométricas, meteorológicas e hidrométricas de la zona de estudio.

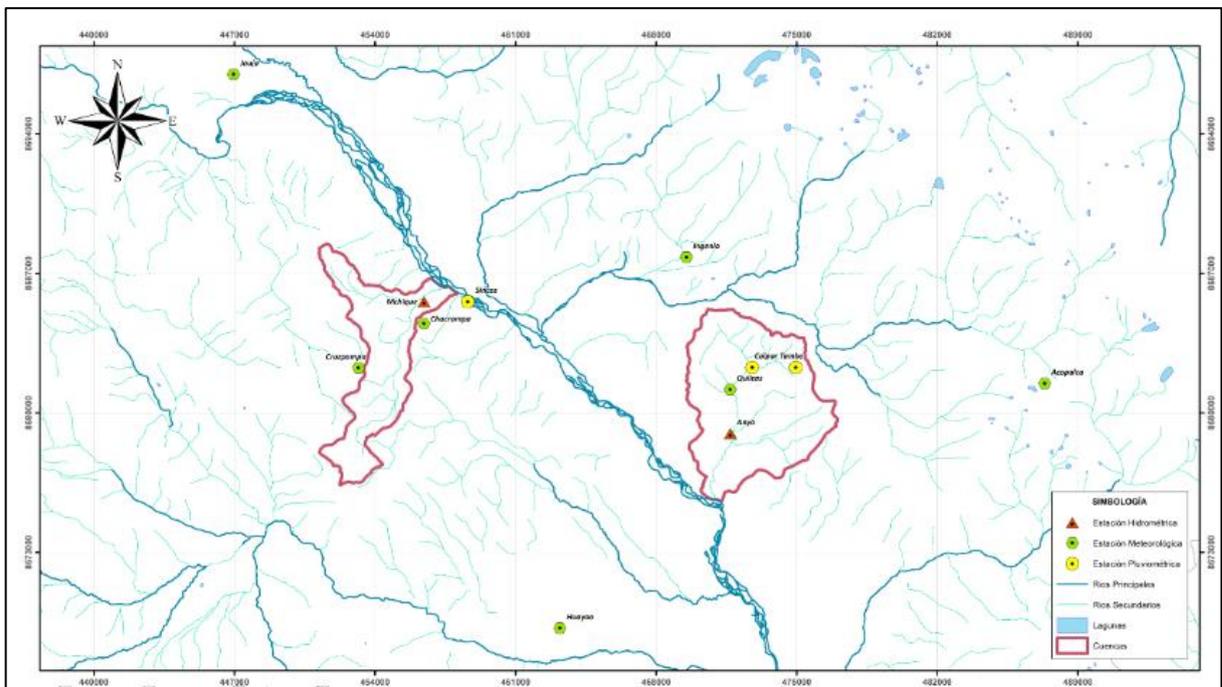


Figura 16: Estaciones meteorológicas, pluviométricas e hidrométricas de la zona de estudio

3.4. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

Se utilizaron los datos de caudales diarios en el período del 01 de enero de 2013 al 31 de diciembre de 2015, los cuales fueron obtenidos de las lecturas limnimétricas en las estaciones hidrométricas Anya y Michque con las curvas de calibración de ambos ríos, reportadas por Camones (2015). Las curvas de calibración de caudales (ecuaciones de transformación de lectura limnimétrica a caudales) son para la cuenca Anya y Mchique respectivamente:

$$Q = 22.66 * (H - 0.017)^{2.997} ; r=0.79 \quad \text{Ec. 110}$$

$$Q = 0.899 * (H - 0.0025)^{1.1381} ; r=0.77 \quad \text{Ec. 111}$$

3.5. INFORMACIÓN PARA CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MORFOLÓGICA

Se ubicaron y descargaron las capas de la Zonificación Ecológica y Económica de la región Junín publicada en agosto del año 2015 y que está en el Sistema Nacional de Información Ambiental - SINAM que es la base de datos del Ministerio del Ambiente – MINAM. En específico, se obtuvo la fisiografía que es la descripción de la naturaleza y sus formas a partir del estudio del relieve (relacionado con la pendiente) y la litósfera (tipo de roca presente). Geología, Uso actual, Capacidad de Uso Mayor y Zonas de Vida.

Los parámetros geomorfológicos nos permiten conocer características de relieve, de forma y de drenaje de las cuencas hidrográficas materia de estudio. Estos parámetros son importantes para caracterizar las cuencas dependiendo de sus resultados; asimismo, influyen de forma directa en el comportamiento hidrológico de las cuencas, específicamente en el tiempo de concentración y la forma de los hidrogramas.

La metodología de cálculo de parámetros se basó en las fórmulas descritas en el marco teórico desde la ecuación 15 a la 34. La base de estas mediciones fueron los mapas elaborados en Arc Map 10.5, con lo cual se obtuvo la delimitación del área que es un atributo básico areal, el perímetro (lineal) y altimétricos. La información morfométrica se trabajó en hojas de cálculo Excel, estimándose cada parámetro con las fórmulas introducidas.

El ordenamiento y la jerarquización de la red de drenaje se realizó en base a los criterios de Horton (1945) modificados por Strahler (1964). Se elaboraron perfiles topográficos longitudinales de los cauces principales de los ríos Anya y Mchique, así como sus respectivas curvas hipsométricas, con la utilización del Microsoft Office en hojas de cálculos Excel.

Para el cálculo del tiempo de concentración se utilizaron fórmulas empíricas propuestas por los investigadores, el total de las cuales están descritas en el marco teórico de la ecuación 35 a la 58, escogiéndose las ecuaciones que fueron desarrolladas en condiciones montañosas y para pendientes pronunciadas que son las características principales de las cuencas Anya y Mchique. Luego, se calcularon los promedios que fueron los que definieron el tiempo de concentración en cada cuenca.

3.6. APLICACIÓN DEL MODELO LUTZ SCHOLTZ

A continuación, se detalla el procedimiento para la aplicación del modelo Lutz Scholtz:

- En principio, se debió obtener los siguientes datos de las cuencas: superficie de aporte de la escorrentía hasta el punto de aforo, altura media, serie de precipitación total mensual del año promedio, temperatura media anual, evapotranspiración total y serie de caudales observados en las estaciones hidrométricas.
- Se tabularon los registros de precipitación total mensual y caudales promedios mensuales de cada cuenca. En el caso de los registros de precipitación, para la cuenca Anya se trabajó con los datos diarios de enero de 2013 a diciembre de 2015 de las estaciones Quilcas, Colpar y Tambo; en Mchique se tuvieron datos de enero de 2014 a diciembre de 2016 de las estaciones Chacrampa y Cruzpampa. En cuanto a los caudales mensuales, se obtuvieron datos desde diciembre de 2013 a marzo de 2015 de las estaciones limnimétricas ubicadas en ambas cuencas. Se utilizaron los porcentajes de aporte a la precipitación según el área de influencia de la estación reportados por Camones (2015).
- Se calcularon los parámetros necesarios para la descripción de los fenómenos de escorrentía promedio como: determinación del coeficiente de escorrentía anual de las cuencas a través de la fórmula propuesta por L. Turc (sugerida por Lutz Scholtz), fórmulas empíricas propuesta por la Misión Alemana en el Plan Meriss II (1980) para la región Junín, los coeficientes del polinomio característico (a_0, a_1, \dots, a_5) mediante las curvas del U.S. Bureau of Reclamation para el cálculo de la precipitación efectiva PE_t mensual en el año promedio.
- Se estimaron y tabularon los valores del escurrimiento para el año promedio en mm/mes (PE_t), teniendo en cuenta los coeficientes de escorrentía estimados en el paso previo.
- Se estimó la retención hídrica de las cuencas teniendo en cuenta la Tabla 25, considerando el área de acuíferos potenciales ($S \leq 12\%$) y pequeñas áreas de bofedales. De acuerdo al valor obtenido de la retención, se calculó el coeficiente de agotamiento con el cual se calculó la relación de caudales. Se determinó la cantidad de meses y días correspondientes al gasto (G), en época de estiaje y, abasto (A) en época de lluvias.
- Se generaron láminas de escorrentía en mm/mes a través del modelo Lutz Scholtz que se transformaron a caudal en m^3/s .

- Se realizó la calibración del modelo mediante el comparativo gráfico entre los caudales generados con el modelo Lutz Scholtz y los caudales observados (registrados) en el período considerado.
- Se calcularon los indicadores de bondad de ajuste del modelo, como el coeficiente de correlación, el coeficiente de Nash-Shutcliffe y el menor error medio cuadrático teniendo en cuenta los caudales generados y los caudales observados en ambas cuencas. De acuerdo al resultado del indicador se procedió al análisis de regresión para establecer las ecuaciones de generación de caudales a través del proceso markoviano de orden 1.
- Se realizó el análisis de relación entre variables a través de la regresión lineal múltiple entre Q_t y Q_{1-t} , PE_t (parámetros de la ecuación) con lo cual se obtuvo la ecuación de generación de caudales medios mensuales, integrando al modelo una componente estocástica (variable aleatoria normal estándar).
- Se generaron 10 series de caudales extendidos mensuales con la ecuación encontrada, a través de un proceso autorregresivo de orden 1 de precipitación efectiva del mes con el caudal del mes anterior, haciendo uso del modelo matemático de Lutz Scholtz.

3.7. APLICACIÓN DEL MODELO SWAT

Como paso preliminar para la aplicación del modelo SWAT, se obtuvieron los siguientes datos de cada cuenca:

- Cobertura de uso de suelos. Archivo en formato “*shapefile*” con la clasificación de la cobertura de uso de los suelos proveniente de la caracterización física de las cuencas.
- Suelos (edafología). Archivo en formato “*shapefile*” con la clasificación de suelos de las cuencas Anya y Mchique. La información mínima necesaria para cada clase de suelo es la textura y el porcentaje de materia orgánica.
- Topografía. Modelo de Elevación Digital en formato “grid”, donde cada píxel contiene la altitud promedio proveniente de la interpolación de curvas de nivel. En el caso de esta investigación, se utilizó el Modelo de Elevación Digital Global del satélite ASTER (GDEM) Versión 3 (ASTGTM) del siguiente enlace: <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/>. El ASTER GDEM proporciona un modelo de elevación digital global (DEM) de áreas terrestres en la Tierra a una resolución espacial de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros de posición horizontal en el ecuador). El desarrollo de los productos de datos ASTER GDEM es

un esfuerzo de colaboración entre la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI).

Características del producto ASTER:

- Colección : Terra ASTER
 - Tiempo de registro : 2000-03-01 a 2013-11-30.
 - Cobertura : 83° Norte hasta 83° Sur.
 - Tamaño del archivo : aprox. 25 MB.
 - Resolución temporal : multianual.
 - Acceso a los datos : abierto.
 - Tamaño del píxel : 30 m.
- Hidrología. Delimitación de ríos (formato “*shapefile*”) de la ANA, los cuales fueron empleados para la delimitación de cuencas con SWAT.
 - Información climática. Se requirió información de un mínimo de 3 estaciones climáticas dentro de cada cuenca. Con dicha información se pudo construir la tabla de datos estadísticos de clima. Se ingresaron los datos diarios de precipitación media (mm), temperatura máxima, mínima y promedio (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s) y se utilizó el simulador de clima para la variable radiación solar. Es ideal tener datos continuos de un período mayor a 5 años.

La Figura 17 muestra los datos de entrada que se deben tener para comenzar a simular con SWAT.

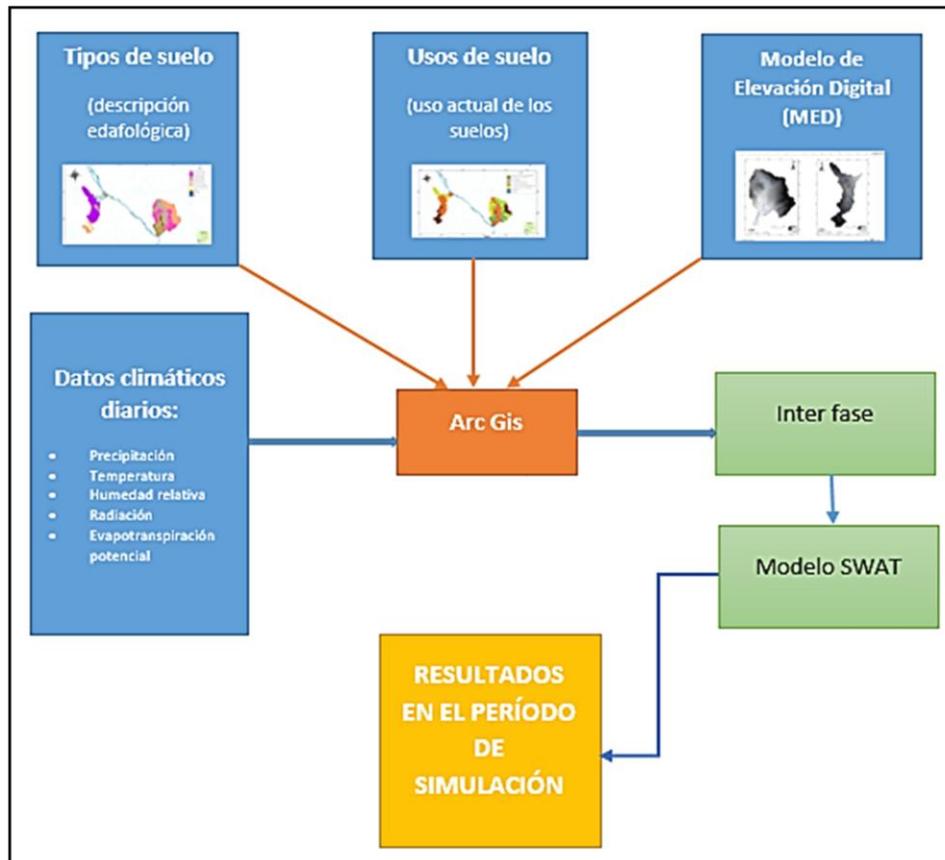


Figura 17: Datos de entrada para la simulación de procesos con SWAT

- La metodología de trabajo con SWAT empieza creándose una carpeta en el disco D (lo más cercano posible) con un nombre adecuado (sin espacios, para no generar errores) con extensión mdb., en donde se fueron agregando todos los archivos que se generaron por defecto con el uso del programa. Previamente debió cambiarse la configuración regional del equipo (opción Configuración regional) con algunos requerimientos del programa SWAT, como por ejemplo que el símbolo decimal sea puntos, que el separador de miles sea coma, que la fecha esté en formato aaaa/mm/dd y acceder a todos los permisos al directorio donde se va a crear el modelo.
- Se cargó el MED dentro de SWAT que previamente fue verificado que esté libre de sumideros, lagunas o huecos a través de la opción *Spatial Analyst Tools, Hydrology, Fill* del ArcGis. La delimitación de las cuencas de estudio se llevó a cabo utilizando la herramienta de la delimitación automática de cuencas del Arc-SWAT en base al MED, teniendo en cuenta que se debe delimitar el área de aporte de la escorrentía hasta el punto de aforo, estación limnimétrica Anya y Mchique respectivamente.

- Con la opción “*Flow direction*” se crearon las redes de corrientes. Se cargó un mapa base desde el Google Earth para corroborar y/o comparar los resultados del SWAT sobre las corrientes delineadas. Esta comparación se pudo realizar con información vectorial provista por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) que ha sido guardada previamente en el mismo proyecto. Luego de la comparación, se verificó que había varios puntos (*monitoring points*) que debían ser retirados porque generaron subcuencas donde no correspondía, procediéndose a eliminarlos. Por ejemplo, la Figura 18 muestra el procedimiento descrito para la cuenca Anya.



Figura 18: Imagen satelital, ríos (ANA) y corrientes generadas en SWAT en la cuenca Anya

- Dentro de la cuenca Anya se generaron 8 sub-cuencas, habiéndose creado al final de este proceso, un archivo de texto con el reporte de características topográficas de todas las subcuencas (Figura 19).

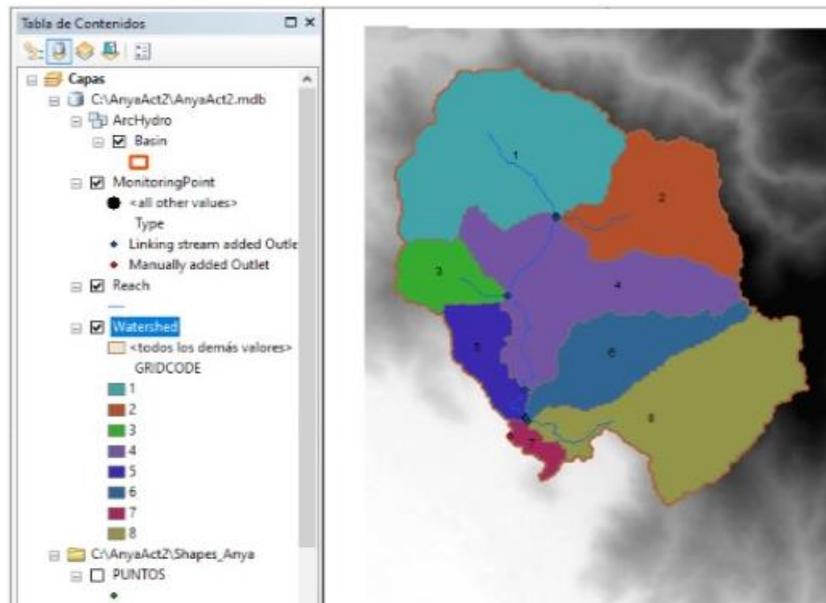


Figura 19: 8 subcuencas generadas por SWAT en la cuenca Anya hasta el punto de aforo

- En el caso de la cuenca Mchique se generaron 11 sub-cuencas lo que puede visualizarse en la Figura 20.



Figura 20: 11 Subcuencas generadas por SWAT en la cuenca Mchique

La delimitación de las subcuencas lo hizo el SWAT para cada uno de los segmentos

de cauce definidos como válidos, donde a cada uno de estos segmentos le corresponde un punto de desagüe (*monitoring point*).

- Para utilizar la opción “*Land Use Data*” (datos de uso del suelo), previamente se colocó en la carpeta de trabajo la carpeta con los datos vectoriales (capas) provenientes de la digitalización de las imágenes del satélite PlanetScop actualizadas a octubre de 2019, debiéndose crear una tabla en código SWAT (Tabla 31) para que pueda ser reconocido por el programa. Si no se cuenta con cobertura vegetal de la cuenca, se puede hacer uso de la data cargada por defecto en el SWAT (datos globales), pero ese no es el caso en esta investigación. Se procedió con la reclasificación de los grupos “*Land Use*” SWAT según códigos propios del programa (Tabla 32).

Tabla 32: Uso actual de los suelos en la cuenca del río Anya y Mchique- código SWAT

Uso actual	Código SWAT
Herbazal	PAST
Area Urbana	URML
Plantación Forestal	FRST
Área Agrícola	AGRL
Río, lagos reservorios	WATR

- A continuación, la Figura 21 muestra el mapa de Uso actual de los suelos de la cuenca Anya hasta el punto de aforo (estación hidrométrica Anya) reclasificado en el SWAT con la imagen digitalizada y actualizada de la cuenca a octubre de 2019.

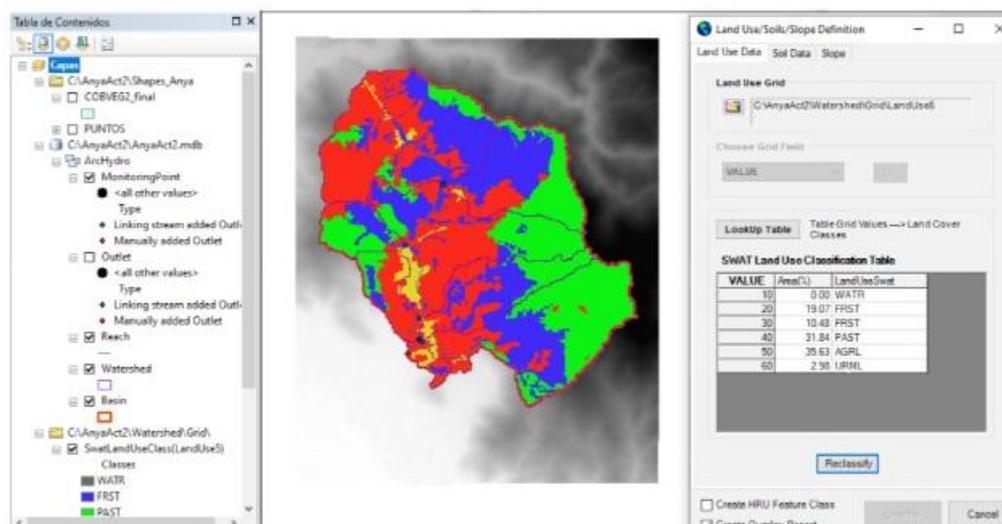


Figura 21: Uso de Suelos de la cuenca Anya reclasificados con código SWAT

- En el caso de la cuenca Mchique, se procedió de la misma manera, reclasificándose los usos del suelo según el código del SWAT, lo cual puede verificarse en la Figura 22.

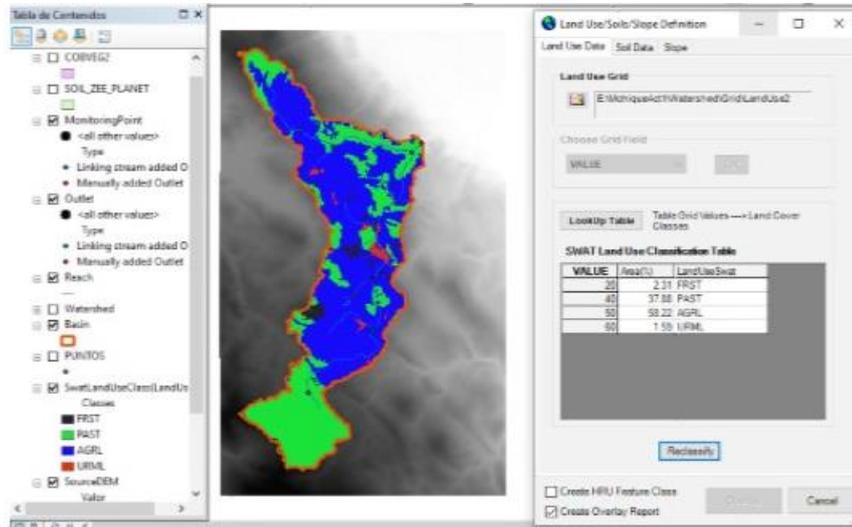


Figura 22: Uso de Suelos de la cuenca Mchique reclasificados con código SWAT

- A continuación, se muestra la generación del mapa correspondiente a los suelos presentes en la cuenca Anya y en la cuenca Mchique, según la ZEE de la región Junín y la imagen satelital actualizada, cuyos nombres y porcentajes están detallados en los resultados correspondientes (Figuras 23 y 24).

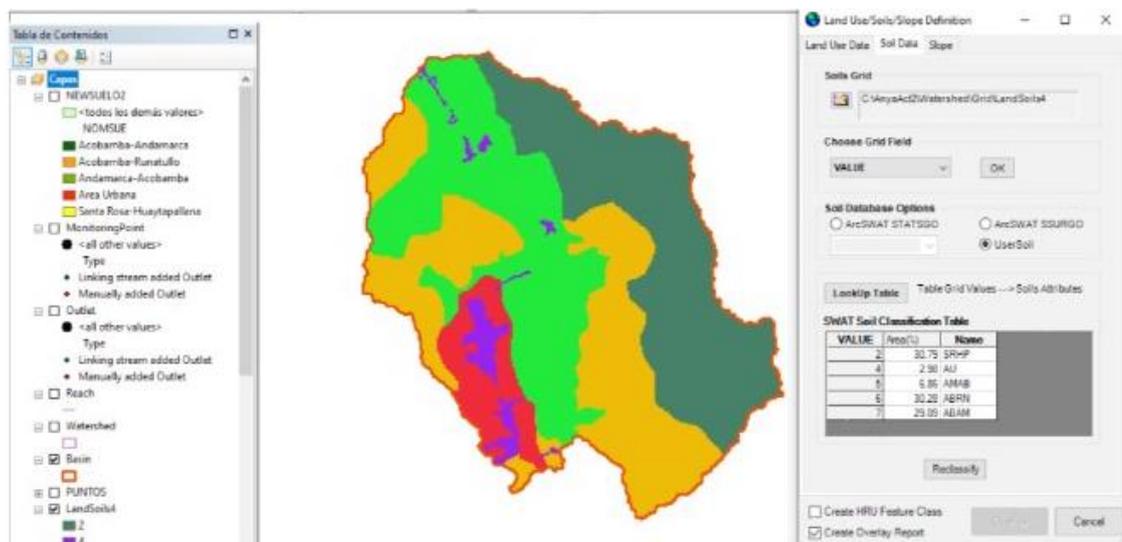


Figura 23: Suelos de la cuenca Anya actualizado al 2019

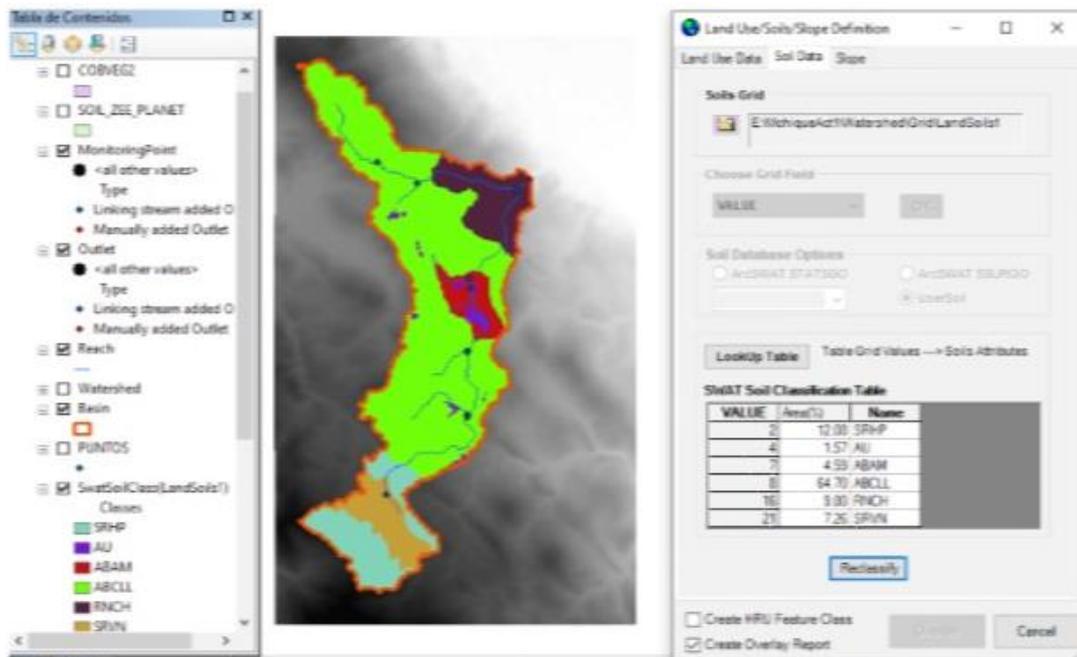


Figura 24: Suelos de la cuenca Mchique actualizado al 2019

- Para caracterizar el suelo, en la pantalla de “*User Soils Edit*” se colocó los parámetros componentes del suelo, entre ellos el nombre del suelo (al que se le colocó una nomenclatura acorde el programa), número de las capas constitutivas del suelo, profundidad máxima de enraizamiento del perfil de suelo, grupo hidrológico del suelo definido por el USDA según su clase textural (diagrama textural), nominados como A, B, C y D, que está descrito a detalle en la Tabla 4, teniendo en cuenta las curvas de conductividad hidráulica a saturación. Asimismo, se debió ingresar los parámetros de las capas de suelo como: profundidad máxima, densidad aparente, agua disponible en el suelo, porcentaje de carbón (indicador de la cantidad de materia orgánica en el suelo), porcentajes de arena, limo y arcilla; porcentaje de roca, factor de erosión del suelo (USLE), salinidad y pH (Figura 25).

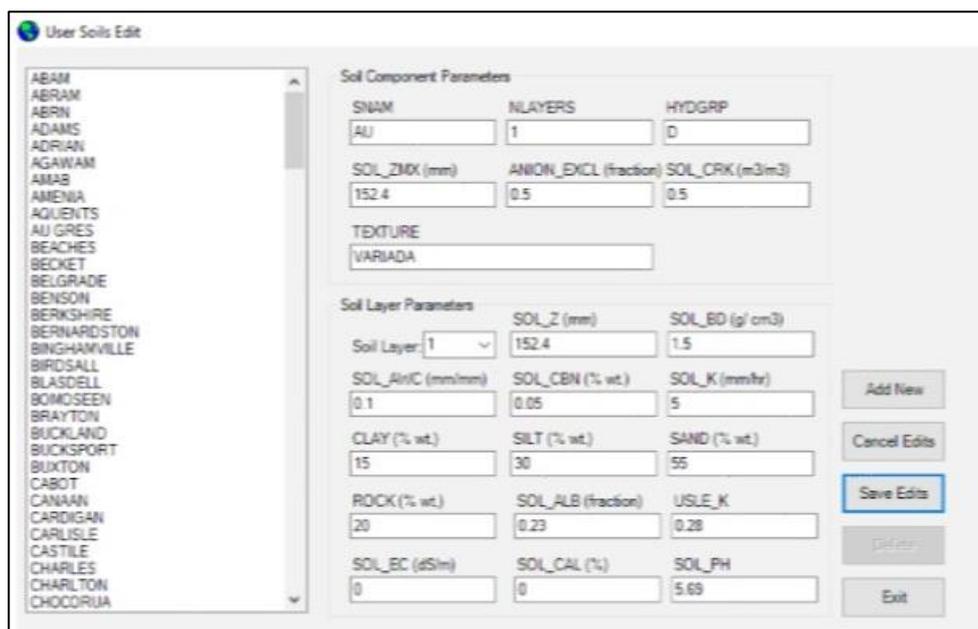


Figura 25: Ejemplo de edición de suelos correspondiente al área urbana (AU) de Anya

- La Tabla 33 contiene los atributos que requiere el SWAT para definir un suelo:

Tabla 33: Atributos requeridos de SWAT para los suelos

Variable	Descripción	Und.
SOL_ZMX	Profundidad máxima de enraizamiento del perfil del suelo.	mm
ANION_EXCL	Fracción de porosidad (espacio vacío) del que se excluyen los aniones.	fracción
SOL_CRK	Volumen potencial o máximo de grietas del perfil del suelo expresado como una fracción del volumen total del suelo.	fracción
SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa.	mm
SOL_BD	Densidad aparente húmeda.	g/cm ³ - Mg/m ³
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la capa del suelo.	mm H ₂ O /mm suelo
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada.	mm/h
SOL_CBN	Contenido orgánico de carbón.	% peso del suelo
SOL_ALB	Humedad del suelo_ albedo.	fracción
SOL_EC	Conductividad eléctrica.	dS/m
USLE_K	Factor de erosión del suelo.	-
CLAY	Contenido de arcilla.	% peso del suelo
SILT	Contenido de limo.	% peso del suelo
SAND	Contenido de arena.	% peso del suelo
ROCK	Contenido de fragmentos de roca.	% peso total

FUENTE: Uribe (2010)

- A continuación, se muestran las tablas 34 y 35 de las cuencas Anya y Mchique con la información de suelos obtenidas de la caracterización edáfica de las cuencas Anya y Mchique (ZEE- Junín) y de las tesis de Gutierrez (2015) y Campos (2014) (verificar en el anexo), con los parámetros del suelo utilizados en la primera corrida del modelo (simulación 01), cuyas variables se tuvieron que ajustar y/o modificar en la etapa de calibración:

Tabla 34: Datos de entrada de los suelos de la cuenca Anya

Descripción		Und.	Datos para ingresar al SWAT				
CUENCA			Anya				
SNAM		-	AMAB	ABRN	SRHP	ABAM	
Soil component parameters	NLAYERS	-	1	1	1	1	
	HYDGRP	-	B	C	D	C	
	SOL_ZMX	mm	300	200	100	150	
	ANION_EXCL	fracción	0.45	0.50	0.4	0.48	
	SOL_CRK	m ³ /m ³	0.00	0.01	0.40	0.00	
	TEXTURE		F	Fa	FA	F	
			Franco	Franco Arcilloso	Franco Arcilloso	Franco	
Soil layer			1	1	1	1	
SOL_Z	mm		200	300	120	300	
SOL_BD	g/cm ³		1.38	1.35	1.4	1.4	
SOL_AWC	mm/mm		0.16	0.18	0.13	0.15	
SOL_CBN	%		2.5	2	1.5	4.3	
SOL_K	mm/h		15	10	10	25	
Soil layer Parameters	CLAY	%	20	35	30	20	
	SILT	%	30	45	40	40	
	SAND	%	50	20	30	30	
	ROCK	%	0	0.2	0.5	0	
	SOL_ALB	fracción		0.04	0.03	0.04	0.04
	USLE_K	-		0.34	0.25	0.24	0.34
	SOL_EC	dS/m		0	0	0	52
SOL_CAL	%		0	0	0	0	
SOL_PH	-		5.7	4.5	5.5	5.69	

Nomenclatura:

F = Franco	AMAB	Andamarca- Acobamba
FA = Franco arenoso	ABRN	Acobamba - Runatillo Santa Rosa -
Fa =Franco arcilloso	SRHP	Huaytapallana
A= Arenoso	ABAM	Acobamba - Andamarca

Tabla 35: Datos de entrada de los suelos de la cuenca Mchique

Descripción		Und.	Datos para ingresar al SWAT				
CUENCA							
Soil component parameters	SNAM	-	ABAM	SRVN	ABCLL	RNCH	SRHP
	NLAYERS	-	1	1	1	1	1
	HYDGRP	-	B	B	B	B	B
	SOL_ZMX	mm	700	300	300	300	400
	ANION_EXCL	fracción	0.48	0.50	0.49	0.44	0.4
	SOL_CRK	m ³ /m ³	0.000	0.001	0.000	0.001	0.100
TEXTURE			F	FA	FaA	FA	FA
			Franco	Franco Arenoso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arenoso	Franco Arenoso
Soil layer			1	1	1	1	1
	SOL_Z	mm	1000	300	500	300	300
	SOL_BD	g/cm ³	1.40	1.60	1.50	1.40	1.40
	SOL_AWC	mm/mm	0.15	0.125	0.183	0.13	0.13
	SOL_CBN	%	2.5	3	1.5	3	1.5
Soil layer Parameters	SOL_K	mm/h	15	26	10	35	20
	CLAY	%	10	20	30	10	15
	SILT	%	40	30	25	30	30
	SAND	%	50	50	45	60	55
	ROCK	%	0	0	0	0	0.5
	SOL_ALB	fracción	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	USLE_K		0.34	0.22	0.24	0.22	0.24
	SOL_EC	dS/m	0	0	0	0	0
SOL_CAL	%	0	0	0.3	0.3	0	
SOL_PH		6.5	7.9	5	6.5	5.5	

Nomenclatura:

F = Franco	ABAM	Acobamba - Andamarca
FA = Franco arenoso	SRVN	Sta. Rosa - Virgen de las Nieves
FaA = Franco arcillo arenoso	ABCLL	Acobamba -Canchayllo
Fa =Franco arcilloso	RNCH	Runatillo - Canchayllo
	SRHP	Sta. Rosa - Huaytapallana

- Con la opción *Slope* (pendiente) se definió los intervalos de clase para las pendientes siendo iguales para ambas cuencas, determinándose 04 clases de pendiente: <12%, 12-25%, 25- 50%, >50%, según la Tabla 36:

Tabla 36: Clases de pendiente en porcentaje para ingresarse al SWAT

Clases de pendiente	Pendiente (%)
Ligeramente inclinado	0-12
Moderadamente inclinado	12-25
Medianamente escarpado	25-50
Escarpado a muy escarpado	>50

FUENTE: D.S. N°017-2009-AG

- A continuación, en las Figuras 26 y 27 se puede ver el mapa de pendientes generados en SWAT de acuerdo a las clases de pendiente dadas en el paso anterior, para las cuencas Anya y cuenca Mchique respectivamente:

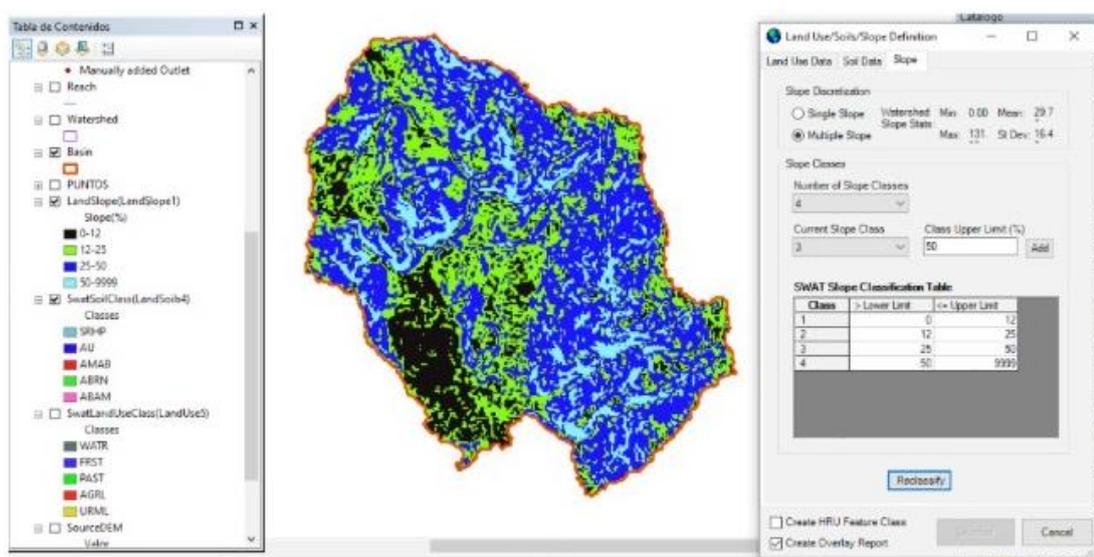


Figura 26: Pendientes de la cuenca Anya generados por SWAT

- En el caso de la cuenca Mchique se puede verificar que en la zona sur (que es parte de una de las cabeceras de la cuenca), existen áreas planas correspondiéndole alturas superiores a 4000 msnm.

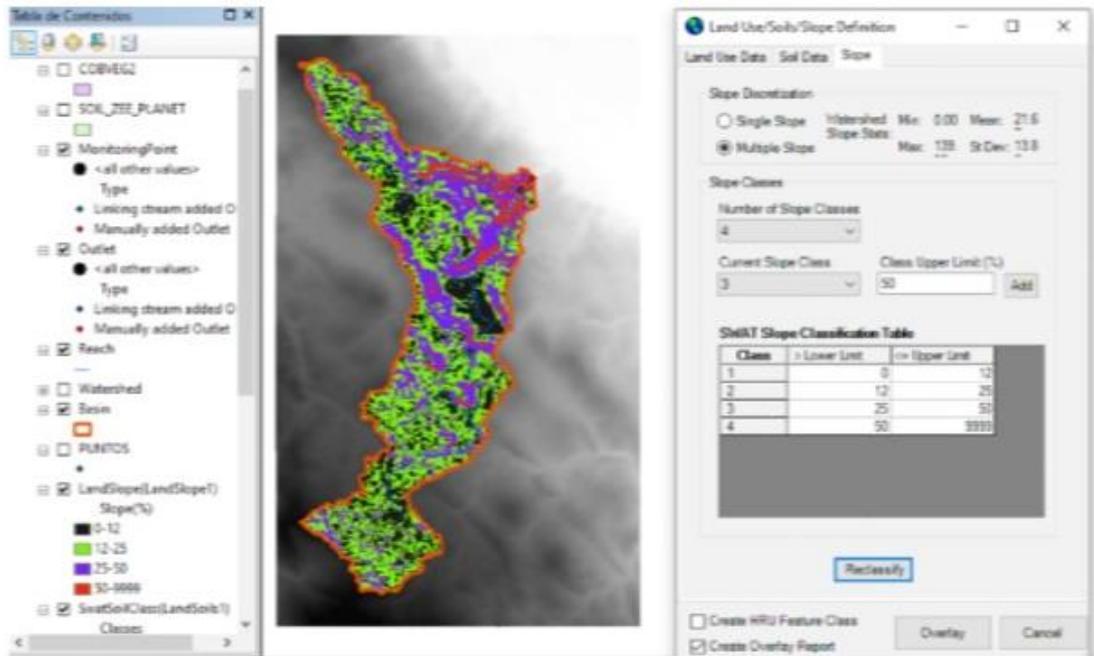


Figura 27: Pendientes de la cuenca Mchique generados por SWAT

- Luego se realizó la definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) mediante un análisis de superposición y una combinación de uso de suelo (cobertura vegetal), tipo de suelo (edafología), y pendiente, donde los usos de suelo, tipos de suelo o pendientes que cubrían menos del 5% del área de la sub-cuenca fueron eliminados para evitar el exceso de parametrización del modelo. En la cuenca Anya se generaron 147 HRU's los cuales se muestran en la Figura 28:

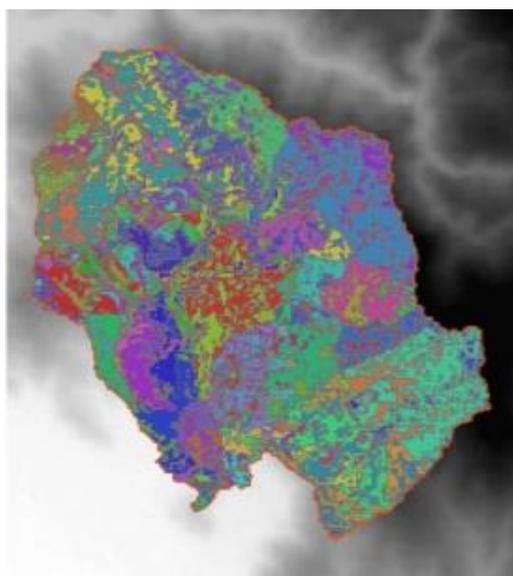


Figura 28: 147 HRU's en la cuenca Anya generados por SWAT

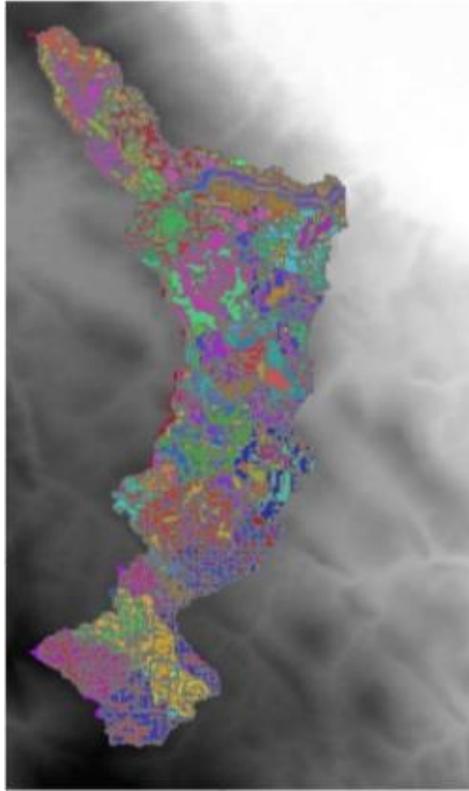


Figura 29: 116 HRU's de la cuenca Mchique generados por SWAT

- En la cuenca Mchique, se generaron 116 HRUs, las cuales se muestran en la Figura 29.
- La cantidad de escorrentía fue estimada aplicando la metodología del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, los que se ingresan en la opción de Uso de Suelos y con datos de lluvia diarios. Esta ecuación se fundamenta en que la escorrentía está determinada por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que se realice.
- Respecto a los datos climáticos de entrada al programa SWAT se descargaron y generaron datos de precipitación y temperatura de PISCO, en tres estaciones por cuenca en el período enero de 1981 y diciembre de 2016. El procedimiento de entrada de las series de datos de precipitación y temperatura es mediante archivos individuales de texto, los cuales debieron ser estructurados de acuerdo a los requerimientos del programa en formato texto, por cada variable y estaciones. La humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar fue simulada por el programa SWAT.
- El modelo SWAT ofrece tres fórmulas para la estimación de la evapotranspiración potencial: Penman – Monteith, Hargreaves y Sammami y Prestley –Taylor. La opción

utilizada en el desarrollo de esta investigación fue Penman - Monteith.

- La calibración está conformada cuatro etapas bien definidas: evaluación de la sensibilidad de parámetros y su influencia en los resultados, procedimientos de optimización de parámetros y control de indicadores de eficiencia para re-optimizar. La evaluación de la sensibilidad de parámetros se verifica cuantitativa y cualitativamente. La cuantificación de la incidencia en los resultados del modelo tiene que ver con el alcance numérico de estos parámetros para con las variables de salida, lo que se visualiza teóricamente mediante las ecuaciones que representan a los procesos descritos y empíricamente desde los resultados. Mientras que su incidencia cualitativa se ve representada no sólo en el efecto que tiene sobre la eficiencia del modelo, la cual puede ser mayor o menor de acuerdo a la variable (o variables) de salida afectada por dicho parámetro, sino en la visualización de los periodos de mayor injerencia en la simulación.
- Los mejores parámetros de calibración fueron seleccionados basados en el análisis gráfico y los parámetros estadísticos. Las técnicas gráficas proporcionan una comparación visual de los datos simulados y observados y una primera visión general de los resultados del modelo. Para la investigación, se emplearon hidrogramas o gráficos de series de tiempo del flujo simulado, que ayudan a identificar el sesgo del modelo, las diferencias en el tiempo, la magnitud de los caudales máximos y la forma de las curvas de recesión. Los parámetros de mayor importancia detectados fueron los relacionados a los procesos de:
 - a. escurrimiento superficial,
 - b. evapotranspiración y
 - c. escurrimiento subterráneo

a. Proceso de escurrimiento superficial

- **CN II: Numero CN método SCS en condición de humedad II (ad.)**

El valor del Número de Curva está descrito a detalle, en el marco teórico.

b. Proceso de evapotranspiración (ET)

- **EPCO: Factor de compensación de la absorción de agua de la vegetación (ad.)**

La cantidad de absorción de agua que ocurre en un día determinado es una función de la cantidad de agua requerida por la planta para la transpiración, E_t , y la cantidad de

agua disponible en el suelo, SW. Si las capas superiores del perfil del suelo no contienen suficiente agua para satisfacer la absorción potencial de agua, los usuarios pueden permitir que las capas inferiores compensen. El factor de compensación de absorción de la planta puede variar de 0.01 a 1.00. A medida que EPCO se acerca a 1.0, el modelo permite que las capas inferiores del suelo satisfagan una mayor demanda de absorción de agua. A medida que EPCO se acerca a 0.0, el modelo permite que ocurra una menor variación de la distribución de profundidad original.

- **ESCO: Factor de compensación de la demanda de ET en estratos superiores (ad.)**
Este coeficiente se ha incorporado para permitir al usuario modificar la distribución de profundidad utilizada para encontrar el suelo demanda evaporativa para dar cuenta del efecto de la acción capilar, formación de costras y grietas. ESCO debe estar entre 0.01 y 1.0. A medida que se reduce el valor de ESCO, el modelo puede extraer más de la demanda de evaporación de los niveles más bajos.
- **GW_REVAP: Coeficiente de proceso Revap (ad.)**
- El agua puede moverse desde el acuífero poco profundo hacia la zona insaturada suprayacente. En los períodos en que el material que recubre el acuífero está seco, el agua en la franja capilar que separa las zonas saturadas e insaturadas se evaporará y difundirá hacia arriba. A medida que el agua se elimina de la franja capilar por evaporación, se reemplaza por agua del acuífero subyacente. El agua también puede ser eliminada del acuífero por plantas de raíces profundas que pueden absorber agua directamente del acuífero. Este proceso es significativo en las cuencas hidrográficas donde la zona saturada no está muy lejos debajo de la superficie o donde crecen plantas de raíces profundas. Debido a que el tipo de cobertura vegetal afectará la importancia de la renovación en el balance hídrico, los parámetros que rigen la renovación pueden variar según el uso de la tierra. A medida que GW_REVAP se acerca a 0, el movimiento del agua desde el acuífero poco profundo hacia la zona radicular está restringido. A medida que GW_REVAP se acerca a 1, la tasa de transferencia del acuífero poco profundo a la zona de la raíz se aproxima a la tasa de evapotranspiración potencial. El valor para GW_REVAP debe estar entre 0.02 y 0.20.
- **REVAPMN: Profundidad del acuífero superficial para producir revap. (mm)**
Umbral de profundidad de agua en el acuífero poco profundo para que se produzca una "renovación" o percolación al acuífero profundo (mm H₂O). El movimiento del agua desde el acuífero poco profundo hacia la zona no saturada está permitido solo si el volumen de agua en el acuífero poco profundo es igual o mayor que REVAPMN. Esta

variable, junto con GW_REVAP, es la razón por la que se crea un archivo de agua subterránea diferente para cada HRU en lugar de cada subcuenca.

c. Proceso de escurrimiento profundo

- **RCHRG_DP: Fracción de percolación de acuíferos profundos**

La fracción de percolación de la zona de la raíz que recarga el acuífero profundo. El valor para RCHRG_DP debe estar entre 0.0 y 1.0.

- **GW_DELAY: Tiempo de demora de recarga del acuífero (días)**

El agua que se mueve más allá de la profundidad más baja del perfil del suelo por filtración o flujo de derivación, ingresa y fluye a través de la zona vadosa antes de convertirse en recarga de acuíferos poco profundos. El retraso entre el momento en que el agua sale del perfil del suelo y entra en el acuífero poco profundo dependerá de la profundidad hasta el nivel freático y de las propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas en las zonas vadosas y subterráneas. El tiempo de retraso, δ_{gw} , no se puede medir directamente. Puede ser estimado simulando la recarga del acuífero usando diferentes valores para δ_{gw} y comparar las variaciones simuladas en nivel de la capa freática con valores observados.

- **ALPHA_BF (α_{gw}): Factor alfa de flujo base (1/días)**

La constante de recesión de flujo base, α_{gw} , es un índice directo de respuesta del flujo de agua subterránea a los cambios en la recarga (Smedema y Rycroft, 1983). Los valores varían de 0.1 - 0.3 para terrenos con respuesta lenta para recargar a 0.9 - 1.0 para terrenos con una respuesta rápida. Aunque la recesión de flujo base constante se puede calcular, las mejores estimaciones son obtenidas analizando el flujo medido durante períodos de no recarga en la cuenca. Es común encontrar los días de flujo base informados para un medidor de corriente o cuenca hidrográfica. Este es el número de días para que la recesión del flujo base disminuya a través de un ciclo de registro. Cuando se conocen los días de flujo base, el factor alfa puede ser calculado de la siguiente forma:

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{N} \ln \left[\frac{Q_{gw,N}}{Q_{gw,0}} \right] = \frac{1}{BFD} \ln[10] = \frac{2.3}{BFD} \quad \text{Ec. 112}$$

En el caso de las cuencas Anya y Mchique, el factor alfa (α_{gw}) se calculó con los datos de Índices hidrometeorológicos de las cuencas de estudio.

- Se realizó una simulación preliminar del modelo una vez modificados los parámetros preliminares y actualizados en la base de datos de parámetros de SWAT. La corrida o simulación del modelo generado se hace desde el programa SWAT Editor, donde se ponen en funcionamiento todos los motores de cálculo de SWAT. Como período de simulación se incluyó a los períodos de Warm Up y de Calibración, considerándose una simulación a paso diario. Como período de Warm Up se consideraron 5 años 1981-1985 y se calibró con la data hidrométrica disponible entre el año 2013 al 2015. Para las salidas del modelo se consideraron las variables correspondientes al ciclo hidrológico y a la erosión producida en las cuencas. En caso observarse mejoras se iteró sobre un mismo parámetro hasta tres veces, luego se mantienen invariables los restantes y se prosigue con otro parámetro o grupo (calibración manual).
- Para la calibración visual gráfica, se comparó hidrogramas de caudales observados y caudales simulados. Los valores de escorrentía simulados fueron comparados con los medidos usando tres técnicas estadísticas aplicadas comúnmente en este tipo de estudios hidrológicos: el Coeficiente de determinación de Pearson (r^2), el índice de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (NSE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS). El r^2 se utilizó como un test de bondad de ajuste entre los resultados simulados y los observados, y sus valores varían entre 0 y 1, donde el 0 indica un pésimo ajuste y el 1 un ajuste perfecto. El NSE fue usado para estimar la eficiencia del modelo, ya que indica que tan bien es el ajuste valor por valor entre lo simulado y lo medido, sus rangos varían entre $-\infty$ a 1, siendo el 1 el ajuste perfecto. Por último, el PBIAS se utilizó para evaluar si los valores simulados fueron mayores o menores que los valores medidos. El valor óptimo es el 0, y un valor positivo de PBIAS indica que el modelo está subestimando los valores medidos, mientras que un valor negativo indica que el modelo sobreestima lo medido.

3.8. FORMULACIÓN DE UN MODELO HÍBRIDO: LUTZ SCHOLTZ MODIFICADO (LSM)

Para la formulación de un modelo híbrido se ha tenido en cuenta la ecuación de balance hídrico propuesto por Lutz Scholtz, de acuerdo a la siguiente ecuación mensual:

$$Q_{m_i} = P_{m_i} - D_{m_i} + Q_{c_i} - Q_{s_i} \quad \text{Ec. 113}$$

Siendo: $P_{m_i} - D_{m_i} = P_{Em_i} \quad \text{Ec. 114}$

Donde Q_{m_i} es el caudal medio mensual (mm/mes), P_{m_i} es la precipitación mensual (mm/mes), D_{m_i} es el déficit de escurrimiento mensual (mm/mes), PE_{m_i} es la precipitación efectiva (mm/mes), Q_{c_i} es la contribución del reservorio cuenca al caudal mensual y Q_{s_i} es el caudal de suministro al reservorio (almacenamiento) de la cuenca, para $i = 1, 2, \dots, 12$ (los meses del año).

Se realizaron dos modificaciones al componente determinístico del modelo Lutz Scholtz (Figura 30), en principio, se encontró una relación empírica para la estimación del coeficiente de esorrentía, la cual está en función de la precipitación total anual en la zona y se descartó la utilización de los coeficientes del polinomio de 5to. Grado del *Bureau of Reclamation* para la estimación de la precipitación efectiva, reemplazándose por la metodología de la Curva Número, considerándose que a través de ella, se puede representar mejor la esorrentía en cuencas agrícolas. El modelo modificado puede ser usado con fines de planificación de uso del recurso hídrico en las cuencas Anya y Mchique de la región Junín, a paso de tiempo mensual.

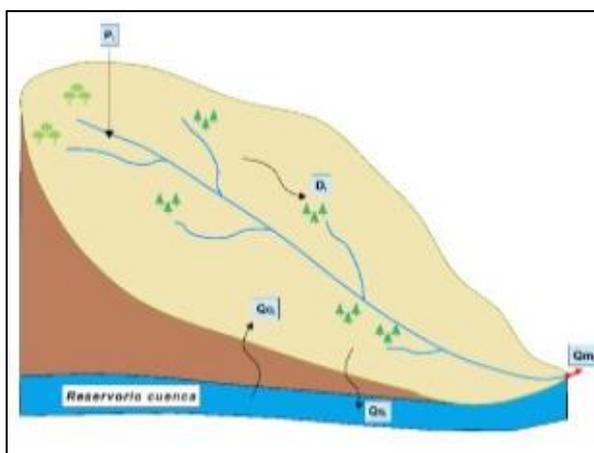


Figura 30: Esquema del Modelo Lutz Scholtz Modificado

FUENTE: Elaboración propia.

a. Componentes del balance hídrico del modelo

Los componentes del balance hídrico mensual del modelo varían de acuerdo a la estación, seca o estación lluviosa, para el año hidrológico promedio. En el caso de la estación seca o época de estiaje (Figura 31), el caudal de la contribución del reservorio cuenca (Q_{c_i}) aumenta el caudal medio en la cuenca:

$$Q_{m_i} = P_{m_i} - D_{m_i} + Q_{c_i} \quad \text{Ec. 115}$$

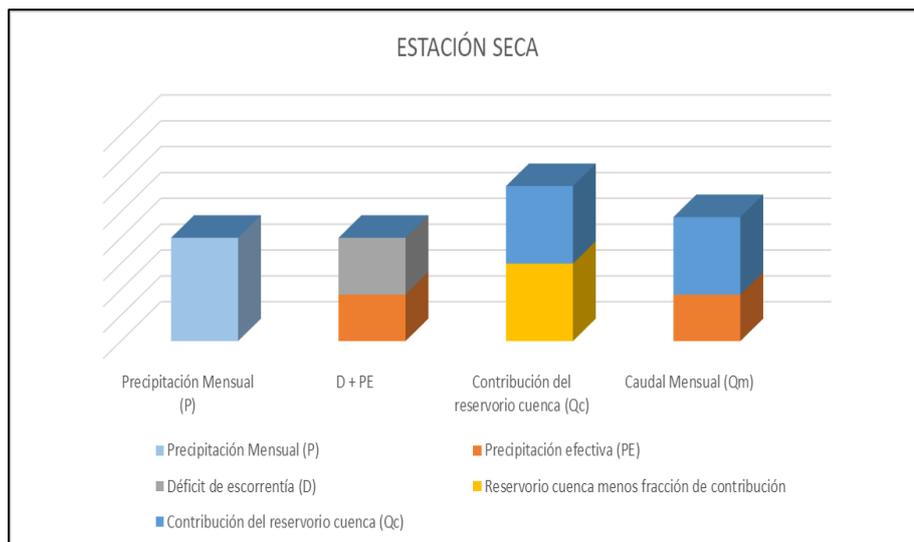


Figura 31: Componentes del Balance Hídrico – Estación seca del año

FUENTE: Adaptado de Plan Meriss II (1980).

En el caso de la estación húmeda o época de lluvias, el caudal de suministro al reservorio cuenca (Q_{s_i}) disminuye el caudal medio en la cuenca (Figura 32).

$$Q_{m_i} = P_{m_i} - D_{m_i} - Q_{s_i} \quad \text{Ec. 116}$$

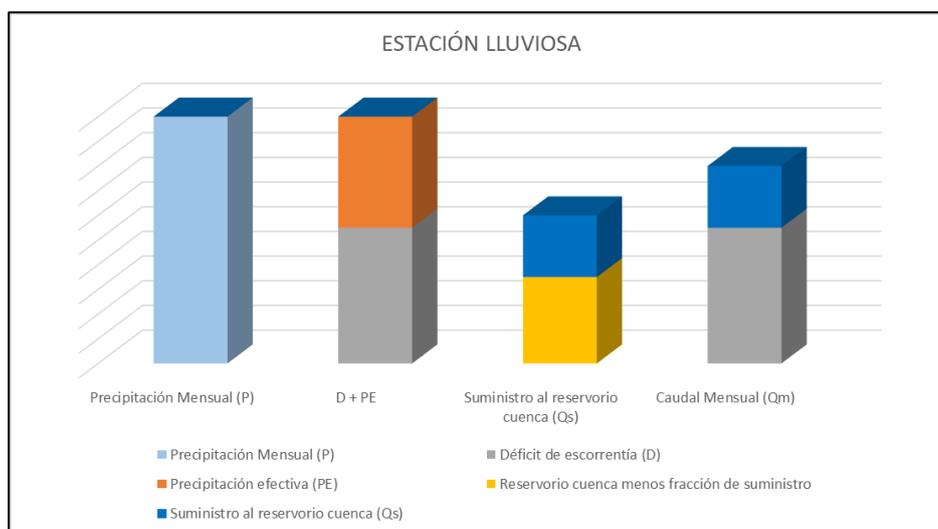


Figura 32: Componentes del Balance Hídrico – Estación lluviosa del año

FUENTE: Adaptado de Plan Meriss II (1980).

b. Determinación de la precipitación efectiva – escorrentía directa

Se calculó la precipitación efectiva y/o escorrentía directa producida por una lluvia, a través de la metodología de la Curva Número (CN) del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USDA- Soil Conservation Service 1968) tal y conforme utiliza el programa SWAT para datos diarios que está descrita a detalle en el marco

teórico, no obstante, en este caso, se utilizaron datos de lluvia mensual. Cabe resaltar que la CN es un método empírico para la transformación de lluvia en escorrentía que surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelos en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente; luego estableció una clasificación de los complejos hidrológicos a los que asignó una capacidad de infiltración (Gaspari *et al.* 2007). El modelo convencional de número de curva (CN) considera que CN es una función del tipo de suelo, uso del suelo y cobertura del suelo en la cuenca.

Para tener en cuenta los efectos hidrológicos de varios tipos de suelo existen cuatro grupos hidrológicos de suelos (GHS) propuestos inicialmente por Musgrave (1955). Estos GHS se designan como A, B, C y D, donde los diferentes grupos de suelos están delineados por sus capacidades mínimas de infiltración. Las capacidades mínimas de infiltración de los distintos grupos de suelos son A: mayor que 7.6 mm/h, B: 3.8 – 7.6 mm/h, C: 1.3 – 3.8 mm/h y D: menos de 1.3 mm/h.

En nuestro caso, con el uso del ArcGis 10.4 dentro del programa HecGeoHms 10.4 y utilizándose la opción Utility, Generated CN Grid, se elaboró el mapa de Curva Número (CN Grid) por cada cuenca, teniendo como base la información cartográfica correspondiente al tipo de suelo (Figura 56) y tipo de cobertura vegetal existente (Figura 57), cuyas tablas de atributos debieron trabajarse y acomodarse colocando los campos necesarios, de acuerdo a las exigencias del programa. Luego, después de hacer correr el programa, se exportó la información contenida en la tabla de atributos de resultados del ArcGis hacia una hoja de cálculo Excel, en la que se calculó la Curva Número ponderada.

Con el valor de Curva Número calculado en el paso anterior, se calculó la abstracción máxima (S) según la relación 117, por lo que a partir con el cual se calculó el umbral de escorrentía o abstracción inicial (I_a), que en un primer momento se consideró un valor constante del 20% de la abstracción máxima en todos los meses, y que luego fue modificado según los grados de humedad previa por cada mes.

$$CN = \frac{25400}{254 + I_a/0.2} \quad \text{Ec. 117}$$

$$I_a = 0.2S \quad \text{Ec. 118}$$

$$PE_i = \frac{(P_i - I_a)^2}{(P_i + 4I_a)} \quad \text{Ec. 119}$$

Donde CN es el número de curva ponderada de la cuenca (adim.), S es la abstracción máxima (mm), I_a es la abstracción inicial (mm) y PE_i es la precipitación efectiva en el mes i.

c. Corrección de las abstracciones iniciales según el grado de humedad previa del suelo

Si los días anteriores a la precipitación estudiada se produjeron precipitaciones abundantes, las abstracciones (retenciones superficiales, infiltración, entre otros) serán menores, por lo que el valor real de I_a será menor al calculado (Tabla 37). Por el contrario, si el mes anterior es un mes seco, todas las abstracciones serán mayores, por lo que se deberá corregir aumentando el valor calculado. Teniendo en cuenta que existen tres condiciones de humedad antecedente en una cuenca según la Tabla 9 del marco teórico, se utilizaron las relaciones propuestas por Hawkins *et al.* (1996) para corrección de la abstracción inicial según el grado de humedad antecedente:

$$I_a(\text{I}) = I_a(\text{II}) 2.281 \quad \text{Ec. 120}$$

$$I_a(\text{III}) = I_a(\text{II}) 0.427 \quad \text{Ec. 121}$$

Tabla 37: Precipitación total en los 5 días anteriores

Plantas en período latente	Plantas en período de crecimiento	Humedad mensual previa
> 13 mm	> 35 mm	Seco (I)
13- 32 mm	35 - 52 mm	Normal (II)
< 32 mm	< 52 mm	Húmedo (III)

FUENTE: Singh (1992).

Nota importante:

Las correcciones por humedad previa del suelo se deben utilizar cuando los datos de precipitación son reales y no han sido generados de manera estadística.

d. Almacenamiento en el Reservorio cuenca (Rc)

El almacenamiento en el “Reservorio cuenca”, denominado por Lutz Scholtz como “Retención de la cuenca”, procede del estudio de la curva de recesión aplicando el algoritmo del depósito lineal como lo describe Wittenberg (1994) citando a Barnes (1939), Plan Meriss II (1980), Bako y Hunt (1988) y Demuth (1989). La curva de recesión del flujo en una sección transversal del río es el hidrograma de descarga de la cuenca durante un período sin lluvia o período seco. Su análisis proporciona información sobre la retención, características de la cuenca, almacenamiento y agotamiento de las aguas subterráneas.

El supuesto básico del modelo Lutz Scholtz es que existe un equilibrio entre la contribución y el suministro del reservorio cuenca al caudal medio mensual que existe en él:

$$Q_{m_i} = PE_i + Q_{c_i} - Q_{s_i} \quad \text{Ec. 122}$$

Donde Q_{m_i} es el caudal mensual (mm/mes), PE_i es la precipitación efectiva mensual (mm/mes), Q_{c_i} es la contribución del reservorio cuenca al caudal mensual y Q_{s_i} es el caudal de suministro al reservorio/almacenamiento de la cuenca. Sumando todos los valores Q_{c_i} y Q_{s_i} respectivamente, se halla el almacenamiento total en el reservorio cuenca durante el año promedio en mm/año.

La curva de recesión ha sido simulada mediante una ecuación lineal simple, fundamentada en que el almacenamiento del acuífero es directamente proporcional a su parámetro de retención (Wittenberg 1994). Es decir, el algoritmo del depósito lineal asume que el volumen de almacenamiento S del depósito y/o reservorio es proporcional a la descarga Q :

$$S = k Q \quad \text{Ec. 123}$$

e. Relación entre descargas (Q_t / Q_0)

El agotamiento de dicho depósito lineal (reservorio cuenca) se puede describir mediante una expresión exponencial:

$$Q_t = Q_0 e^{(-\frac{t}{k})} \quad \text{Ec. 124}$$

Donde Q_t es la descarga en el tiempo t (m^3/s), Q_0 es la descarga inicial de la curva de agotamiento (m^3/s), k es la constante de retención con las dimensiones de tiempo y “ e ” es la constante de Neper. Escrita de otra manera, la ecuación 122 es:

$$Q_t = Q_0 e^{(-a t)} \quad \text{Ec. 125}$$

f. Constante de retención y coeficiente de agotamiento

El coeficiente de agotamiento de la cuenca es la inversa de la constante de retención:

$$a = 1/k \quad \text{Ec. 126}$$

Para determinar el coeficiente de agotamiento de las cuencas Anya y Mchique se utilizaron los datos de caudales diarios completos pertenecientes al año hidrológico 2014. A nivel mensual se seleccionaron las curvas de recesión más representativas, las cuales empezaron con un valor alto de caudal y valores subsecuentes iguales o menores que el anterior, se considera parte de la curva de recesión hasta que existe un incremento en el caudal y por ende en la curva. Para cada valor del tiempo (días) existe un valor de coeficiente de agotamiento, sin embargo, se desprecia su variación y se emplea un valor promedio calculado para los caudales de una curva de recesión representativa de los meses de estiaje.

g. Duración de la estación seca y estación húmeda

Se debe establecer qué meses corresponden al período de estiaje y qué meses corresponden al período húmedo. En el caso de las cuencas Anya y Mchique, el período considerado en estiaje es de abril a setiembre y para época húmeda se considera de octubre a marzo, lo que totaliza 183 días en ambas cuencas.

h. Cálculo de la retención en el reservorio cuenca (mm/año)

Se determinó el área de acuíferos potenciales (áreas con $S \leq 12\%$) y área de lagunas y nevados en las cuencas de estudio, dato que, en nuestro caso, se obtiene desde el mapa generado por SWAT de acuerdo al tipo de pendiente (Figura 26 y 27) para multiplicar dichas áreas por su lámina correspondiente (Tabla 26) y luego sumarlas, lo que da como resultado el total de la retención del reservorio cuenca en mm/año.

i. Contribución al reservorio cuenca (Q_{ci})

Durante la estación seca de “m” meses de duración, el caudal disminuye en la siguiente relación:

$$Q_j/Q_0 = b_0^j \quad \text{Ec. 127}$$

Donde Q_j es el caudal del mes j, Q_0 es el caudal inicial y b_0^j la relación de caudales Q_j y Q_0 durante la estación seca de m meses.

$$b_m = \sum_{i=1}^m b_0^i \quad \text{Ec. 128}$$

Que corresponde a la contribución total de la cuenca durante el período de estiaje o agotamiento total de la reserva hídrica de la cuenca. Por lo tanto, la contribución mensual del reservorio cuenca (retención de la cuenca) durante la estación seca se puede representar por la siguiente ecuación:

$$Q_{ci}/Rc = b_0^i / \sum_{i=1}^m b_0^i \quad \text{Ec. 129}$$

Donde Q_{ci} es la contribución del reservorio cuenca al caudal mensual en mm/mes, Rc es el almacenamiento total en el reservorio cuenca, b_0 es la relación entre el caudal del mes actual y el anterior, y b_0^i es la relación entre el caudal del mes i y el caudal inicial.

j. Suministro al reservorio cuenca (Q_{si})

Para el cálculo del suministro al reservorio cuenca se puede utilizar los coeficientes mensuales en porcentaje determinados por Lutz en el 1980 (S_i), y que se han consolidado en la Tabla 27, sin embargo, para fines de esta investigación se cambiaron y utilizaron los porcentajes que mejor simulaban el comportamiento del caudal, los cuales se probaron en las dos cuencas de estudio: Anya y Mchique. El Q_{si} que entra en el reservorio cuenca se considera como un déficit mensual de la precipitación efectiva y se calcula según la siguiente ecuación:

$$Q_{si} = S_i \frac{Rc}{100} \quad \text{Ec. 130}$$

3.9. PRONÓSTICO CLIMÁTICO AL 2100

Para evaluar los efectos del cambio climático en las cuencas Anya y Mchique y realizar el pronóstico climático al 2100, se utilizaron los modelos de cambio climático y los datos climáticos globales obtenidos desde la página de *Climate Explorer*: <https://climexp.knmi.nl/>. El KNMI Climate Explorer es una aplicación web para analizar datos climáticos estadísticamente. Comenzó a finales de 1999 como una página web exclusiva para analizar teleconexiones ENSO y ha crecido a lo largo de los años a más de 10 TB de datos climáticos y docenas de herramientas de análisis. Ahora es parte del Centro Regional del Clima de la OMM en KNMI (Real Instituto Meteorológico de los Países Bajos). La Figura 33 muestra el portal de descargas del *Climate Explorer*.

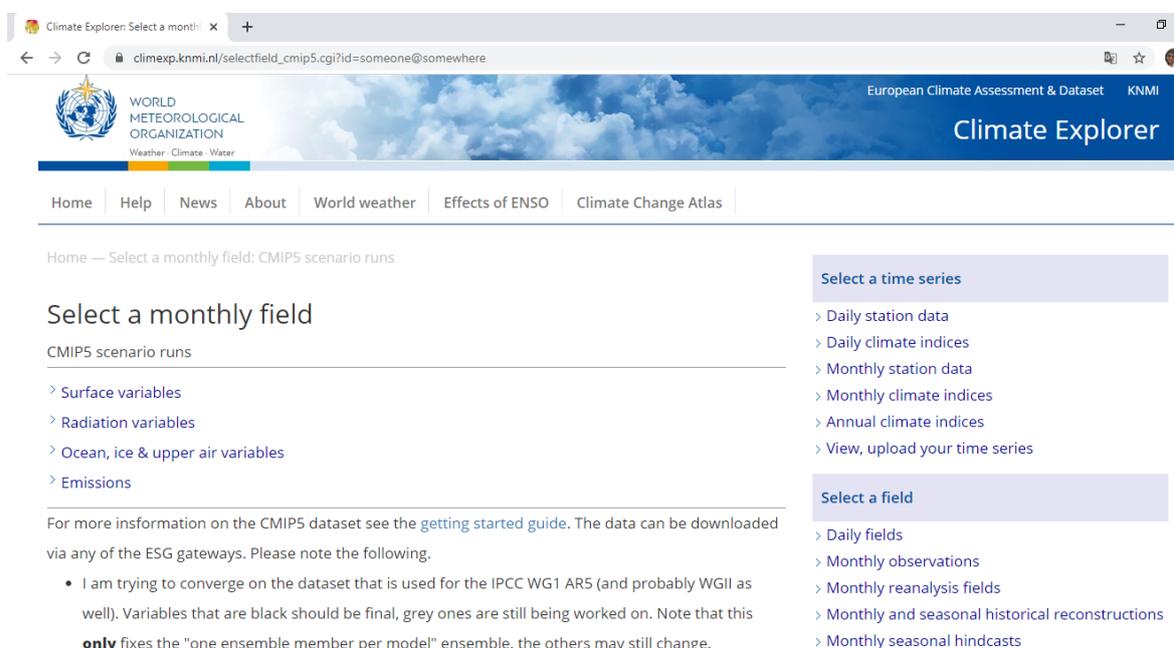


Figura 33: Portal de descargas del *Climate Explorer*

FUENTE: https://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip5.cgi?id=someone@somewhere

3.9.1. Cálculo de proyecciones climáticas

En la presente tesis, con propósitos comparativos, se utilizaron los modelos en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 pertenecientes al CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) (Taylor *et al.*, 2012) que corresponden a los modelos que mejor representan los sistemas sinópticos que modulan el clima de Sudamérica (Acuña *et al.*, 2011). Como primer paso, se delimitó el área de estudio a través de sus coordenadas geográficas (Figura 34), luego los datos de precipitación y temperaturas promedio fueron extraídos como códigos ASCII, y

pegados en una hoja Excel, en donde fueron promediados entre 1980 a 2010 para la situación actual del clima (período de referencia) y de 2070 al 2100 para la situación futura. Para cada modelo se obtuvo el porcentaje de variación de la precipitación y la variación de la temperatura en grados centígrados a paso de tiempo mensual, con éstos se ajustaron los datos para cada modelo identificado, preparandose las series de precipitación y temperaturas necesarios para estimar las descargas futuras con los requerimientos del modelo SWAT. Asimismo, se graficaron los histogramas de precipitación actual y futura, así como el meteorograma de temperatura actual y futura para visualizar si el modelo escogido reproduce adecuadamente el comportamiento estacional de las variables de las cuencas en estudio.



Figura 34: Delimitación del área de estudio en Climate Explorer

FUENTE: <https://climexp.knmi.nl/select.cgi>

En la Tabla 38 se presentan las ecuaciones utilizadas para el cálculo de cambios estacionales de precipitación y temperatura al 2100.

Tabla 38: Cálculo de la variación de precipitación y temperaturas

$PREC.camb = \left(\frac{PREC.fut - PREC.hist}{PREC.hist} \right) \times 100\%$	$T.camb = T.fut - T.hist$
<ul style="list-style-type: none"> • $PREC.camb.$ = Cambio de precipitación (%). • $PREC.fut.$ = Promedio multianual de la precipitación acumulada (2070-2100), promedio anual (series de tiempo). • $PREC.hist.$ = Promedio multianual de la precipitación acumulada estacional o anual (1980-2010). 	<ul style="list-style-type: none"> • $T.camb.$ = Cambio de temperatura (°C). • $T.fut.$ = Promedio multianual de la temperatura (2070-2100) promedio anual (series de tiempo). • $T.hist.$ = Promedio multianual de la temperatura acumulada estacional o anual (1980-2010).

En el caso de la generación de datos de precipitación y temperaturas diarias en las cuencas Anya y Mchique descargadas desde la base de datos PISCO del SENAMHI, se utilizó el lenguaje de programación R, escogiendo tres puntos (correspondiente a estaciones meteorológicas) para cada cuenca, con las siguientes coordenadas para Anya y Mchique respectivamente (Tabla 39):

Tabla 39: Puntos de generación de datos con PISCO

Cuenca	Punto / Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (msnm)
Anya	X ₁ = Anya	-11.955222	-75.259996	3279
	X ₂ = Ingenio	-11.865254	-75.279995	3390
	X ₃ = Huayao	-12.033490	-75.338052	3360
Mchique	X ₁ = Mchique	-11.885246	-75.399994	3350
	X ₂ = Quilcas	-11.915234	-75.259995	3355
	X ₃ = Sta. Ana	-12.004167	-75.216736	3295

Las estaciones utilizadas en cada cuenca, coinciden con los grupos de regiones homogéneas reportadas por Ccori en el 2019 por el método del Vector Regional: cuenca Anya (Grupo 1) y cuenca Mchique (Grupo 2). Se generaron precipitación y temperaturas con longitud de registro entre el 01 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 2016. Es de mucha importancia tener en cuenta que distancias menores a 5 km entre puntos, generarán salidas y/o datos iguales por lo que tuvo que utilizarse estaciones fuera de las cuencas también.

3.10. MODELAMIENTO DINÁMICO ESPACIAL

El cambio de uso del suelo representa uno de los grandes desafíos que se antepone a los planes de sostenibilidad actual, debido a que contribuye al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad (Ramos *et al.* 2019 citando a Mahmood *et al.* 2010). Los factores que lo impulsan varían a nivel regional y se modifican a través del tiempo por la presencia de fenómenos como el crecimiento poblacional, la globalización y la apertura del mercado de exportación, que podrían modificar el escenario de la conversión de tierras en el futuro (Ramos *et al.* 2019 citando a Schmitz *et al.* 2015). Es por ello que, para el modelamiento hidrológico de las cuencas Anya y Mchique en condiciones futuras se consideró necesario realizar un modelamiento espacial, para lo cual se utilizó como herramienta el programa IDRISI TerrSet y su módulo LCM (*Land Change Modeler*), ya que esta herramienta de modelado ha mostrado resultados satisfactorios en estudios de esta naturaleza para el noreste

de Brasil y varias otras partes del mundo (Mishra *et al.* 2014). El *Land Change Modeler* (LCM) es un modelo de análisis del cambio en la cobertura y uso del suelo y también de predicción. Este modelo proporciona un completo análisis de los cambios en el suelo mediante la creación de mapas y gráficos del cambio del suelo, transiciones y tendencias de los tipos de suelo. En cuanto al módulo de predicción, este modelo es capaz de crear escenarios de cambio del uso del suelo con la integración de los factores biofísicos y socioeconómicos que influyen en el cambio de uso de la tierra. Por lo general, los factores biofísicos integrados en el modelo son tipo de uso del suelo, la altitud, la pendiente (derivada de los modelos digitales de elevación (MDE) y características hidrológicas (distancia a los ríos y lagos). En cuanto a los factores socioeconómicos, el modelo podría utilizar la infraestructura (carreteras) y la demografía (Oñate & Bosque 2010).

En esta investigación, se utilizaron los mapas de cobertura vegetal del 2010 extraído de la ZEE de la región Junín y el mapa de cobertura vegetal del 2019 digitalizado a partir de la imagen del satélite PlanetScope comprada para el propósito específico del desarrollo de la presente investigación. La pestaña de análisis de cambio de LCM determina la tendencia de cambio y los píxeles cambiados de manera constante de las diferentes clases de cobertura del suelo. También produce un mapa de cambios basado en las imágenes anteriores (2010) y posteriores (2019). En este trabajo, el modelado dinámico consistió en tres pasos principales: (a) predicción del potencial de transición, (b) simulación y (c) validación. El procedimiento consistió en la entrada de los mapas de los años 2010 y 2019 en formato tif, asignándole un código numérico a cada cobertura que se guardó en formato texto (Tabla 40). Seguidamente, se muestran las entradas y los resultados (salidas) del módulo LCM del TerrSet.

Tabla 40: Códigos de asignación de cobertura ambas cuencas

Código	N°	Cobertura
255	1	Área externa
2	2	Áreas agrícolas
3	3	Pastos
4	4	Area urbana
5	5	Bosque

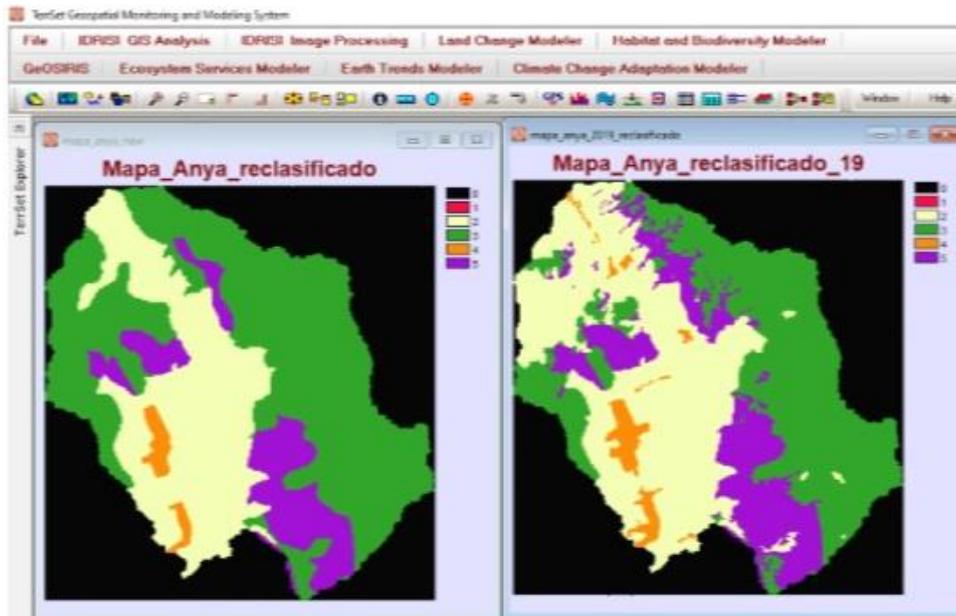


Figura 35: Mapas de cobertura vegetal 2010 (izq.) y 2019 (der.) cuenca Anya

Cabe resaltar que según lo que se puede apreciar en la Figura 35 derecha, la cuenca Anya ha sido reforestada con fines de control de la erosión en las quebradas. Se visualiza también que ha habido un aumento del área urbana, la cual se ha ido ubicando a lado de las carreteras hacia el norte de la cuenca. A través de la tabulación cruzada (opción CROSSTAB) se obtuvieron las permanencias y las transiciones. En el paso de predicción del potencial de transición, se analizaron los principales cambios y las permanencias en la cobertura del suelo en la cuenca entre t_1 (2010) y t_2 (2019). Estos análisis son necesarios para la definición de las clases de transición básica para el modelado.

Las variables se seleccionan mediante la prueba de Cramer. En este caso, las variables que presentan valores de Cramer > 0.15 se consideraron en el modelado de la cobertura del suelo, según lo recomendado por Hamdy *et al.* (2017). La prueba de Cramer utiliza valores entre 0 y 1, de modo que cuanto más cercano sea el valor 1, cuanto mayor es la asociación entre la variante explicativa y las clases de transición definidas. Al ser cuencas pequeñas se utilizaron las distancias de transiciones principales como variables de explicación. A continuación, se muestra el mapa de clasificación cruzada obtenido del TerrSet (Figura 36) donde se visualizan las permanencias y las transiciones que sirvieron para proyectar el mapa de cambio al 2030, previa verificación de errores, así como la Tabla 41 donde se explican las equivalencias numéricas de las permanencias y transiciones.

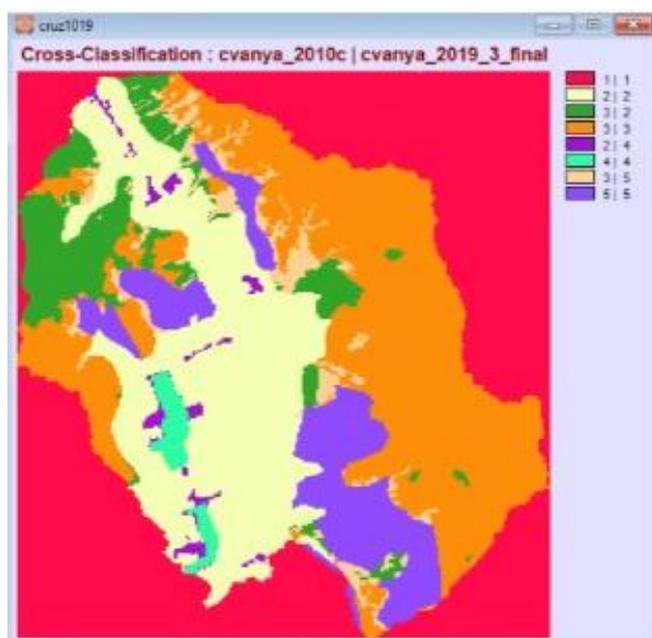


Figura 36: Mapa de tabulación cruzada entre 2010 y 2019

Tabla 41: *Permanencias y transiciones de cobertura en la cuenca Anya*

N°	De...a....	Permanencias y transiciones	Símbolo
1	1 - 1	Exterior de la cuenca	P
2	2 - 2	Areas agrícolas – Areas agrícolas	P
3	3 - 2	Pastos – Areas agrícolas	T
4	3 - 3	Pastos - Pastos	P
5	2 - 4	Areas agrícolas - Area urbana	T
6	4 - 4	Area urbana - Area urbana	P
7	3 - 5	Pastos - Bosque	T
8	5 - 5	Bosque - Bosque	P

El *Land Change Modeler* procesa los mapas y entrega el estado de ganancias y pérdidas, así como el cambio neto de la cobertura del territorio. En la cuenca Anya se verifica que del 2010 al 2019 existió una pérdida de aproximadamente 6 km² de pastos, un incremento de bosques (reforestación) y área urbana, como se puede ver en las Figuras 37 y 38.

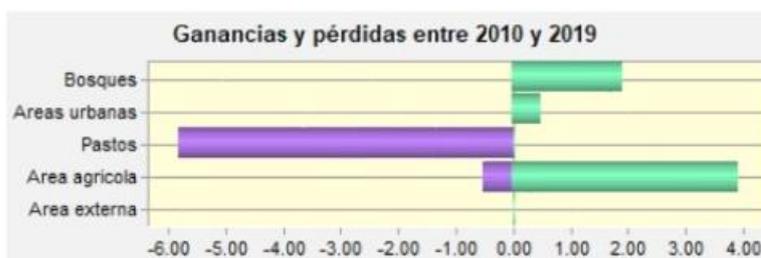


Figura 37: Ganancias y pérdidas de terreno (km²) cuenca Anya- Salida TerrSet

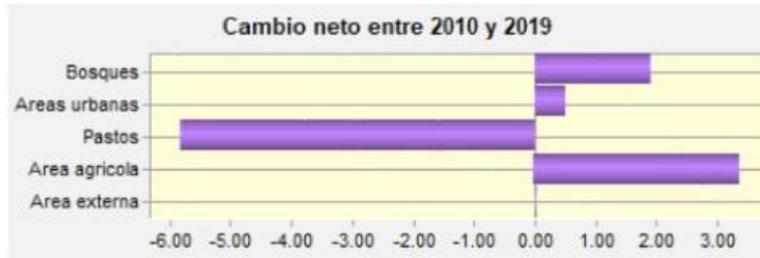


Figura 38: Cambio neto (km²) cuenca Anya entre 2010 y 2019- Salida TerrSet



Figura 39: Mapa de cambios cuenca Anya entre 2010 y 2019- Salida TerrSet

El programa también muestra los terrenos que no han sufrido cambios en el período de estudio, lo que se denomina persistencias (Figura 40).

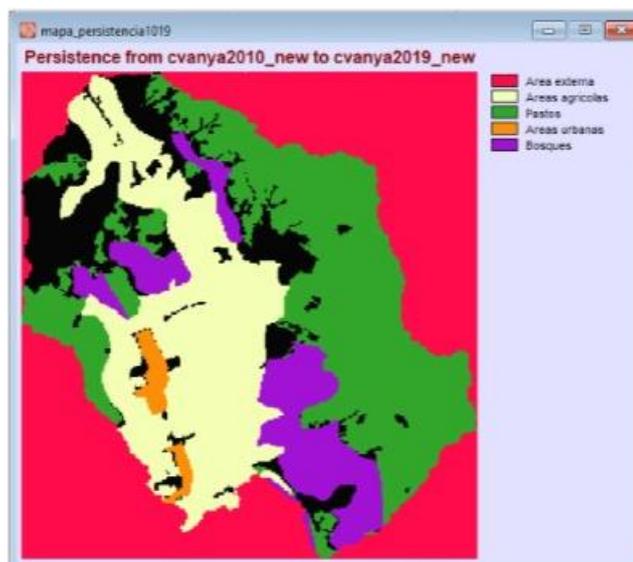


Figura 40: Mapa de persistencias entre 2010 y 2019 cuenca Anya – Salida TerrSet

El análisis de las transiciones es importante para modelar el cambio en el futuro, teniendo en cuenta la probabilidad de cambio que también es calculada por el programa. En Anya, se nota que las variables que están aportando más al cambio de uso de suelo son las áreas agrícolas y los pastos, de acuerdo al coeficiente de Cramer (Figura 41). Además, la Figura 42 contiene el mapa proyectado al 2030 de cambio de uso de suelo (cobertura vegetal) como resultado de la aplicación del modelo LCM.

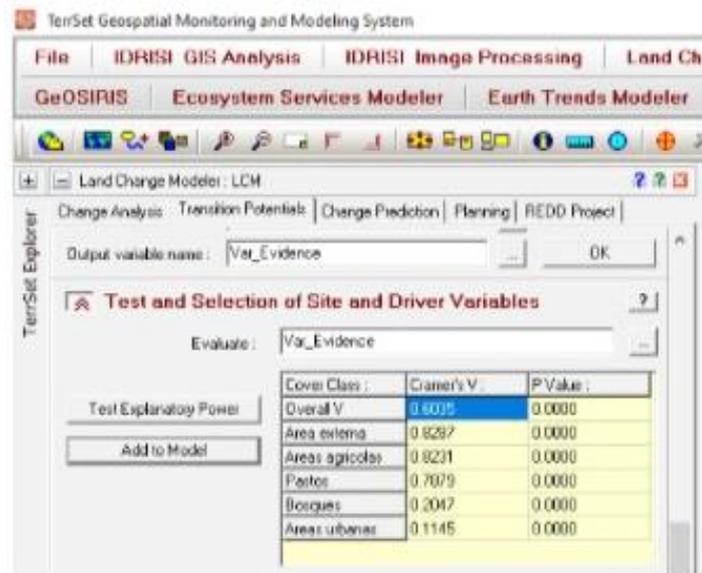


Figura 41: Coeficiente de Cramer para identificación de variables

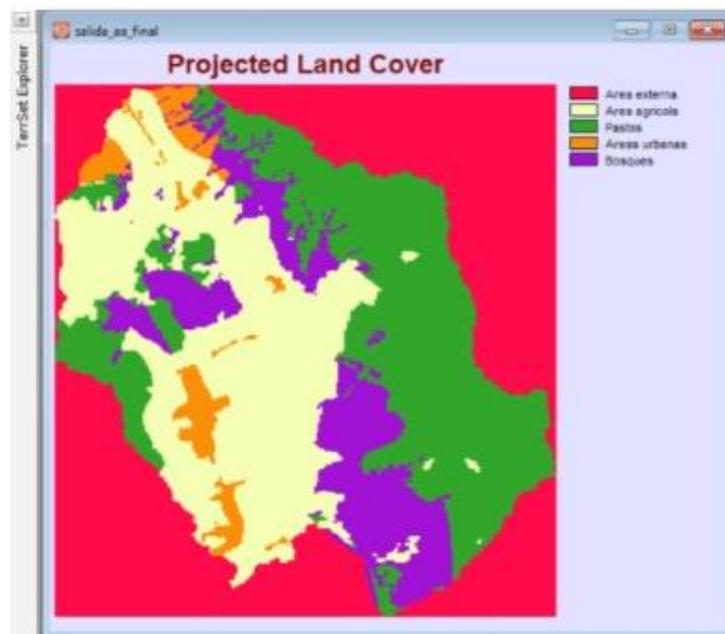


Figura 42: Mapa proyectado del cambio de cobertura en la cuenca Anya (2030)

La tasa de precisión resultante del modelo de cambio de uso de suelo en la cuenca Anya fue de 57.8%. Una vez obtenido el mapa de cobertura terrestre proyectado en formato tif., se lleva al ArcMap para transformarlo a formato capa (shp.) y luego ingresarlo como dato al programa SWAT y modelar las descargas en condiciones futuras.

En el caso de la cuenca Mchique, se trabajó del mismo modelo que en la cuenca Anya (mapas de 2010 y de 2019 respectivamente). La Figura 43, muestra el cambio de cobertura ocurrido en la cuenca Mchique en el período transcurrido entre 2010 y 2019 y la Figura 44 muestra el resultado de la tabulación cruzada (izquierda – sin corregir; derecha – corregida).

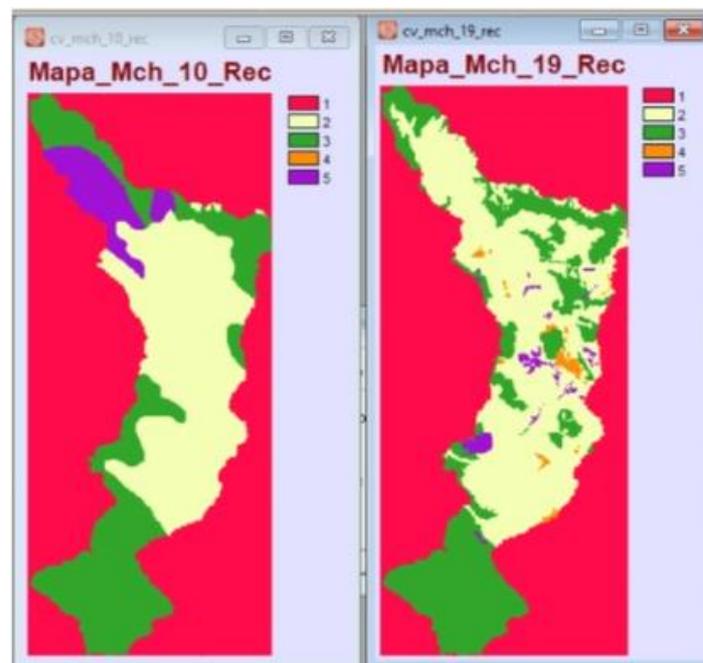


Figura 43: Mapas de cobertura vegetal 2010 (izq.) y 2019 (der.) cuenca Mchique

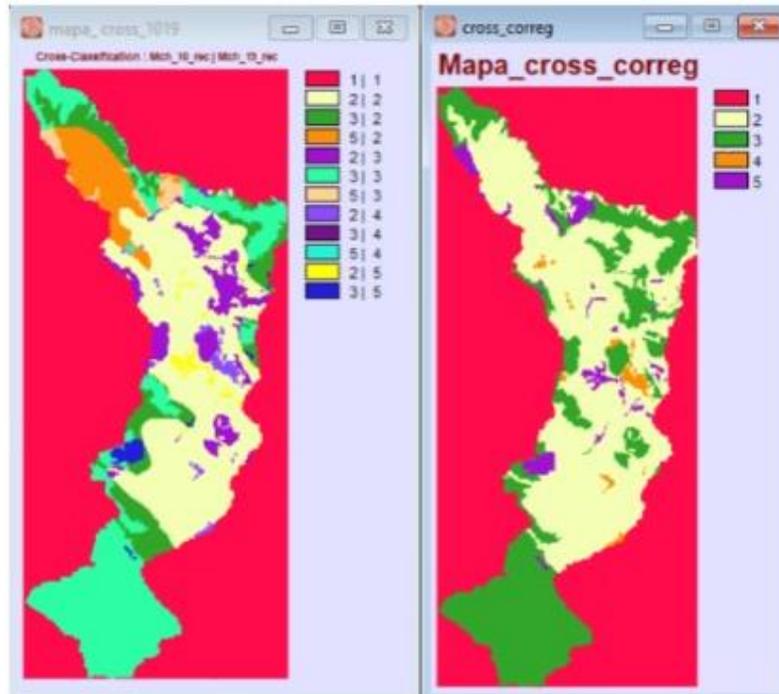


Figura 44: Mapa de tabulación cruzada (Izq - sin corregir; Der- corregida)

Se realizó un análisis de las transiciones resultantes (Tabla 42); de las nueve transiciones encontradas, se utilizaron tres en el módulo LCM, las transiciones: 2 – 4 (áreas agrícolas a área urbana); 3 – 2 (Pastos a área agrícola) y 5 – 4 (Bosque a área urbana). Cabe resaltar que en el 2010 no se verificó existencia de áreas urbanas en la cuenca (o eran muy dispersas).

Tabla 42: Permanencias y transiciones de cobertura en la cuenca Mchique

Nº	De....a....	Permanencias y transiciones	Símbolo
1	1 - 1	Exterior de la cuenca	P
2	2 - 2	Areas agrícolas - Areas agrícolas	P
3	3 - 2	Pastos - Areas agrícolas	T
4	5 - 2	Bosques - Areas agrícolas	T
5	2 - 3	Areas agrícolas - Pastos	T
6	3 - 3	Pastos - Pastos	P
7	5 - 3	Bosques - Pastos	T
8	2 - 4	Areas agrícolas - Area urbana	T
9	3 - 4	Pastos - Area urbana	T
10	5 - 4	Bosque - Area urbana	T
11	2 - 5	Area agrícola - Bosque	T
12	3 - 5	Pastos - Bosque	T

Además, se muestra el estado de ganancias y pérdidas de terrenos por cada cobertura en la cuenca Mchique en donde se verificó que hubo un cambio de uso por áreas urbanas que antes no había. Se han incorporado nuevas áreas a la agricultura (aproximadamente 5 km²) y se han modificado los usos de terrenos dedicados a la agricultura en el 2010.



Figura 45: Ganancias y pérdidas de terreno (km²) cuenca Mchique- Salida TerrSet

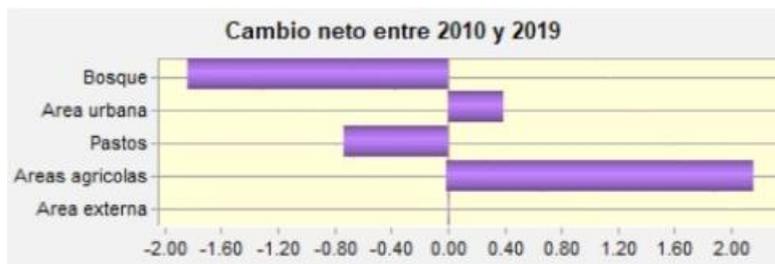


Figura 46: Cambio neto (km²) cuenca Mchique entre 2010 y 2019- Salida TerrSet



Figura 47: Mapa de cambios cuenca Mchique entre 2010 y 2019- Salida TerrSet

En la cuenca Mchique se han verificado la existencia de cambios significativos en relación a la transformación de, por ejemplo, bosques en áreas agrícolas (deforestación en poca más de 1.5 km²), y el cambio de áreas agrícolas y pasto en áreas urbanas. Sin embargo, en general el área de la cuenca es pequeña y por ende es más difícil modelar el cambio de uso de suelos.

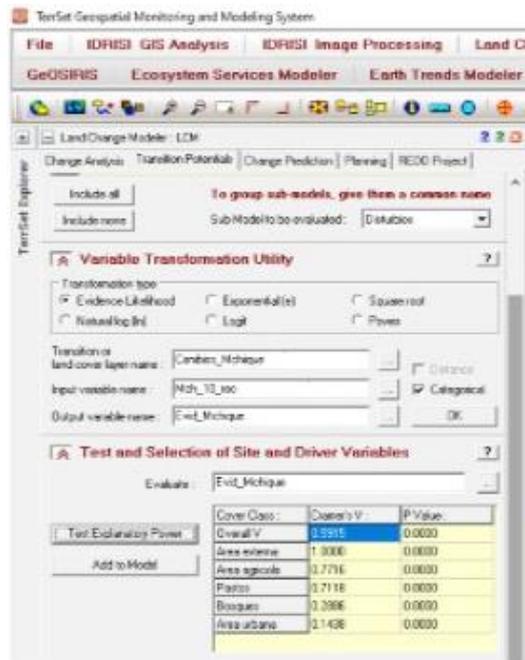


Figura 48: Coeficiente de Cramer para identificación de variables

La Figura 48 contiene los coeficientes de Cramer resultado del análisis en el LCM en donde se puede notar que las variables de cambio más importantes son las áreas agrícolas y los pastos.

Se corrió el modelo *Land Change Modeler* con las tres transiciones más importantes definidas en el paso anterior, utilizándose la opción de redes neuronales, pero el resultado de la tasa de precisión del modelo de cambio de uso de suelo en la cuenca Mchique al 2030 fue de 35.26% (baja tasa de precisión), sin embargo, se utilizó su salida como insumo de ingreso al modelo SWAT. A continuación, se puede ver el mapa proyectado al 2030 de la cuenca Mchique (Figura 49), donde se puede ver que existirá una tendencia al incremento de área urbana hacia el norte de la cuenca, que en el mapa del año 2010 no existían (muy probablemente porque las casas estaban muy dispersas), lo cual influirá en la cantidad de escorrentía que se generará en la cuenca.

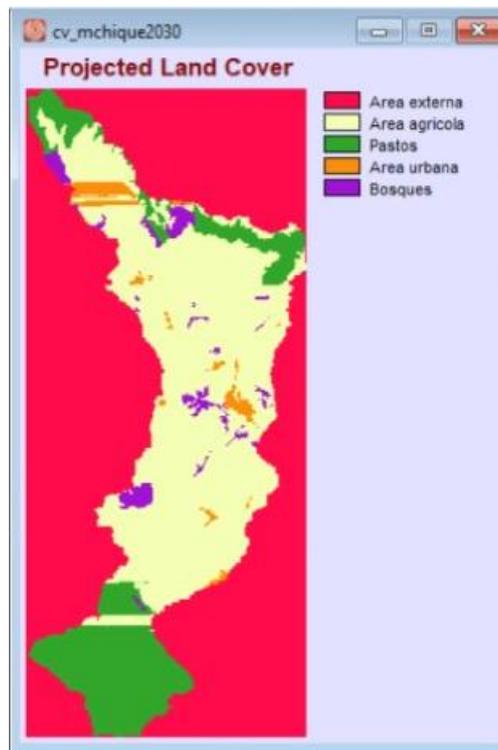


Figura 49: Mapa proyectado del cambio de cobertura (2030) - cuenca Mchique

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

En principio se realizó la comparación entre las imágenes satelitales recientes obtenidas de los satélites Rapideye y Sentinel 2B del 2015 y 2018, para ver la variación respecto a la cobertura vegetal de las cuencas de estudio entre esos años, considerando que los mapas iniciales utilizados en el desarrollo de la tesis, fueron tomados de la Memoria Descriptiva de la Zonificación Ecológica y Económica de la Región Junín (Esc=1/100 000). A continuación, se puede ver las imágenes comparativas obtenidas de los satélites, pertenecientes a las cuencas Anya (Figura 50) y Mchique (Figura 51), en donde no existe variación, notándose la presencia de la carretera hacia el noroeste en ambos años.

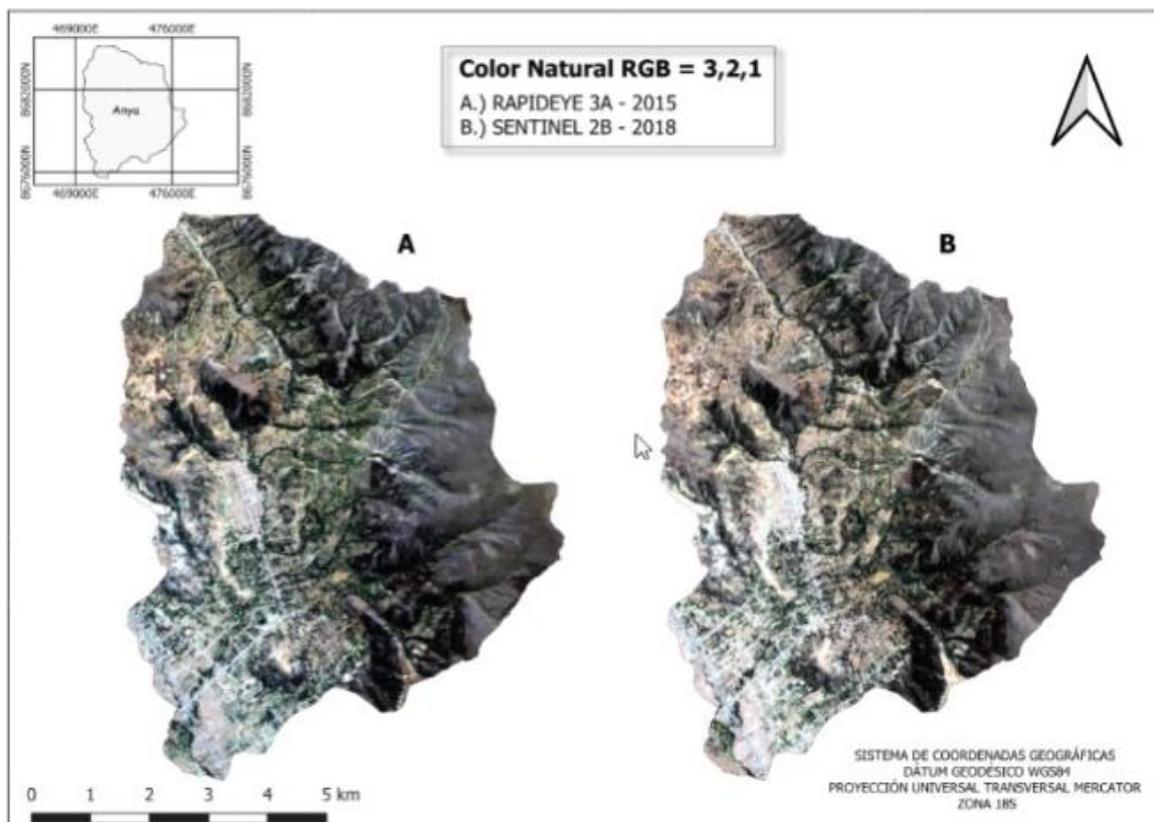


Figura 50: Imágenes comparativas en diferentes años A) 2015 y B) 2018, cuenca Anya

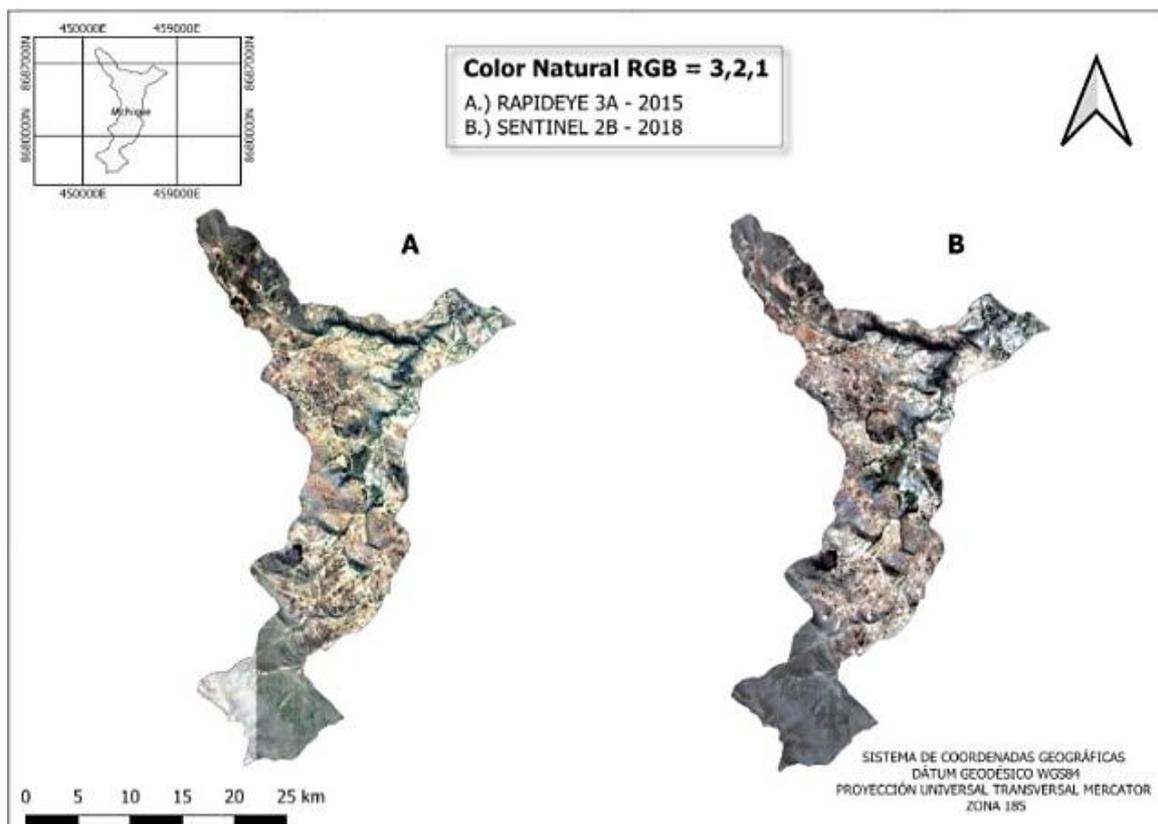


Figura 51: Imágenes comparativas en diferentes años A) 2015 y B) 2018, cuenca Mchique

4.1.1. Características hidrográficas

Las redes hidrográficas de las cuencas de estudio están diferenciadas según su ubicación (Figura 52), siendo que ambas cuencas aportan a la red hidrográfica del río Mantaro y la característica principal de sus caudales es la estacionalidad, con crecidas entre diciembre y marzo, coincidente con la época lluviosa debido a su origen pluvial, no existiendo lagunas al interior de las cuencas. Sin embargo, los ríos Anya y Mchique presentan ciertas diferencias respecto a sus características: el río Anya tiene un lecho poco rocoso y parcialmente vegetado, siendo sinuoso en la parte baja y el río Mchique no tiene una trayectoria ondulante pero sí un lecho rocoso en todo su trayecto. Estas características son importantes para la cuantificación de los parámetros tales como el coeficiente “n” de Manning.

4.1.2. Características fisiográficas y topográficas

La Fisiografía está definida como la descripción de la naturaleza y sus formas a partir del estudio del relieve y la litósfera. El relieve se relaciona con la pendiente y la litósfera se relaciona con el tipo de roca presente, cuyo modelado es el resultado de la acción dinámica

de diversos agentes y fenómenos, existe también dentro de este modelado la interacción de factores tectónicos, orogénicos, y por procesos erosivos y deposicionales han dado origen a las Geoformas identificadas en la Región Junín.

La configuración topográfica es variada, desde suave (parte baja de las cuencas) hasta quebradas accidentadas en las partes altas o líneas de altas cumbres (divisorias de aguas). El punto más alto de la cuenca Anya está a 4310 msnm y para la cuenca Mchique se tiene como punto más alto a la cota 4220 msnm. La cuenca del río Anya cuenta con tres tipos de relieves: plano o llanura en la parte baja de la cuenca donde está asentada la población urbana, colinas en donde se siembra la papa nativa y finalmente un relieve montañoso; además posee una topografía predominantemente accidentada (60% aproximadamente). Asimismo, esta cuenca cuenta con tres tipos de relieves: plano o llanura en la parte baja de la cuenca donde está asentada la población urbana, colinas en donde se realizan prácticas agrícolas y finalmente un relieve montañoso; además posee una topografía predominantemente accidentada (75% aproximadamente). Las características topográficas y altimétricas de las cuencas del río Anya y Mchique, pueden ser apreciadas en la Figura 53. A continuación, se describen las características fisiográficas encontradas:

a. Paisaje

Es la categoría central del sistema del análisis fisiográfico, donde se conjuga la forma, litología y edad de las geo-formas del terreno. Agrupa a unidades con similitud en su origen y en su característica litológica, factores ambos involucrados en la generación del material parental del suelo. La litología hace referencia a la caracterización de las rocas que conforman el subsuelo. Los paisajes encontrados en la zona de estudio son planicies, montañas y colinas.

b. Sub paisaje

Es la tercera categoría del sistema del análisis fisiográfico. Agrupa a unidades fisiográficas caracterizadas en base a su altura y posición, aspectos que indican el uso del suelo y su potencial, así como su manejo. A continuación, se coloca una breve descripción de los subpaisajes encontrados en la zona de estudio:

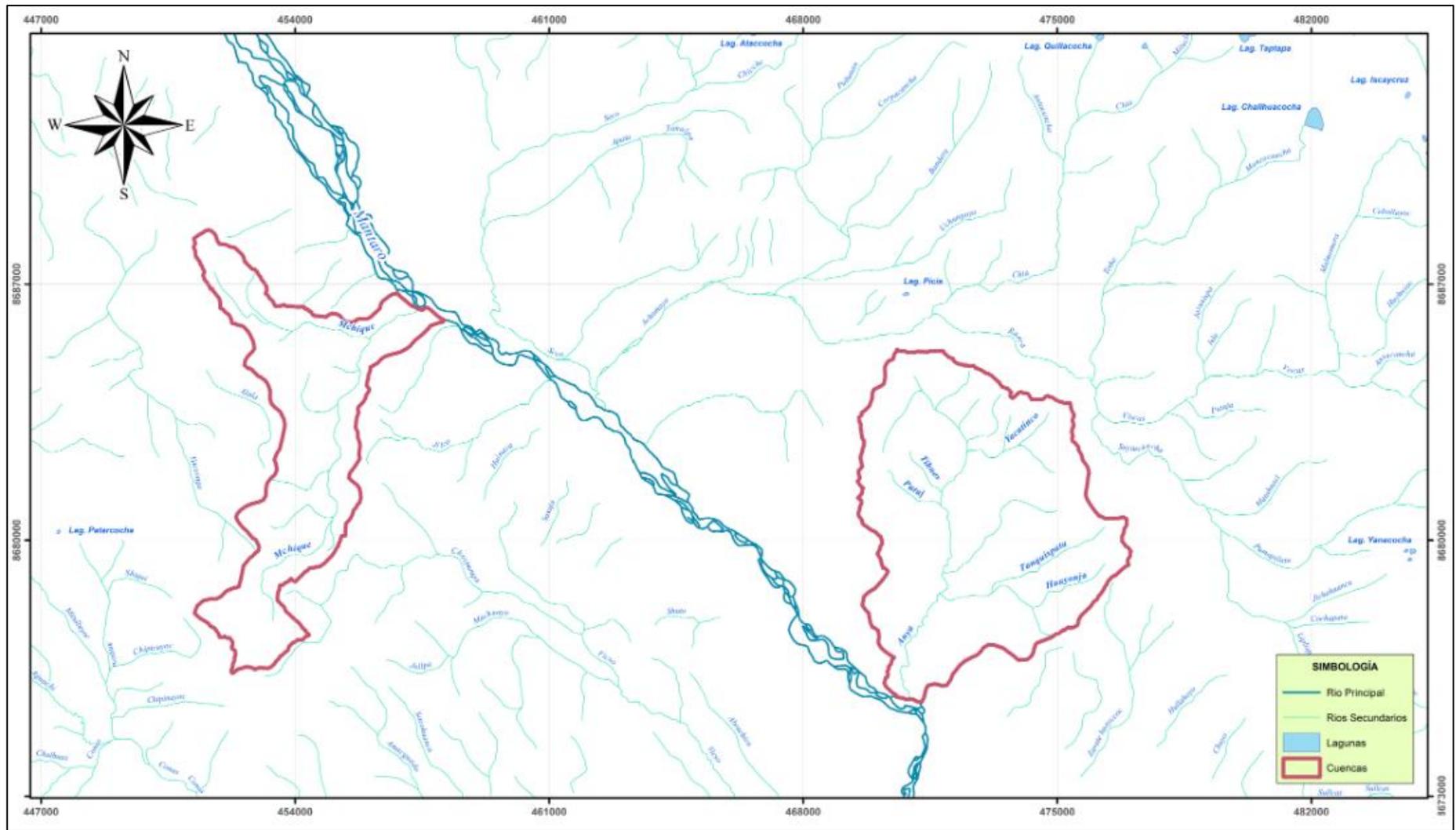


Figura 52: Red hidrográfica de la zona de estudio

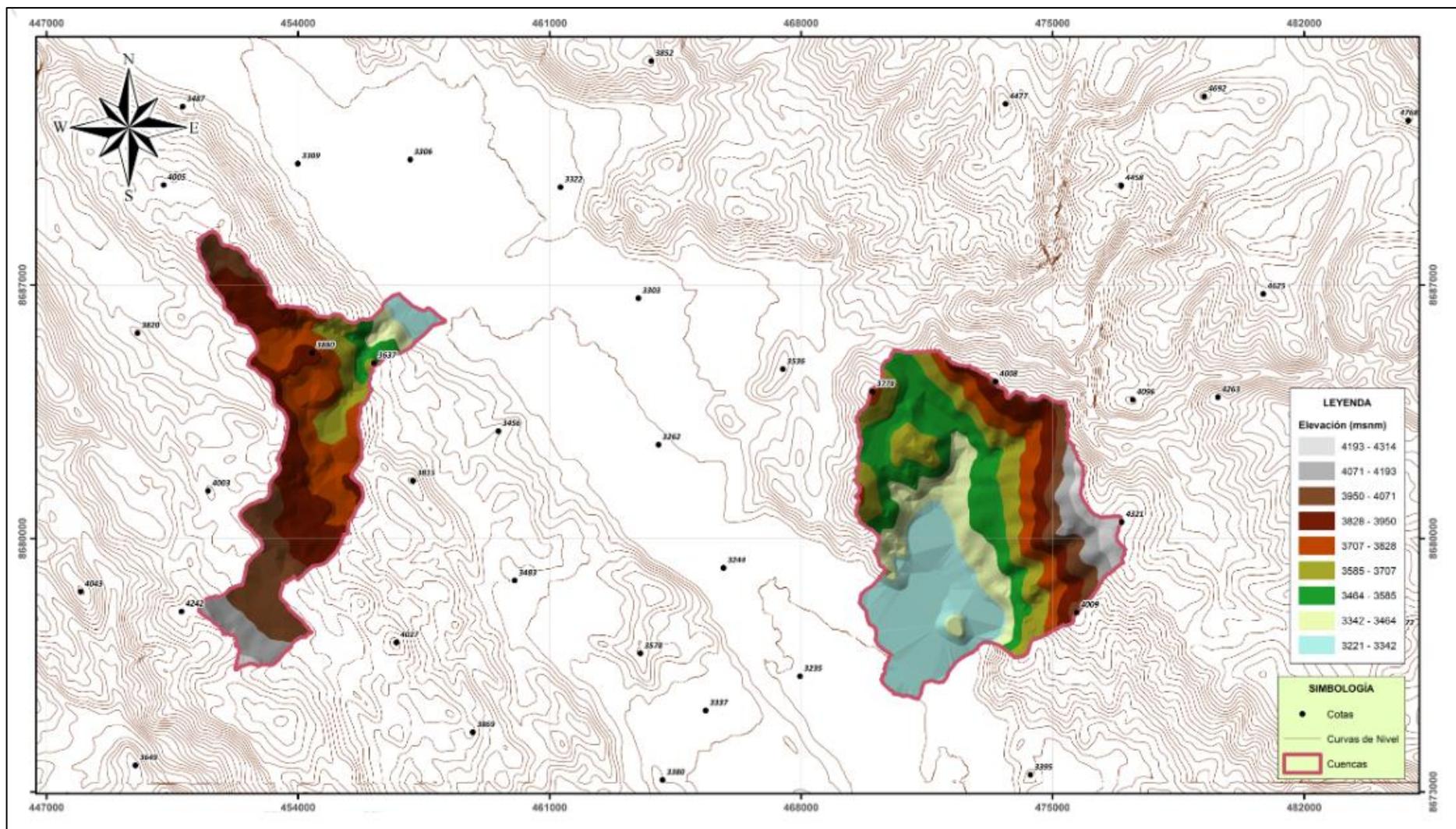


Figura 53: Mapa topográfico de la zona de estudio

Planicies aluviales se consideran los siguientes subpaisaje:

- Terrazas bajas, franjas longitudinales con alturas menores a 10 m, con relación al nivel medio del río.
- Terrazas medias, franjas longitudinales con alturas entre 10-30 m, con relación al nivel medio del río.
- Fondo de valle, las terrazas son muy angostas, de pequeña extensión.

Planicies Coluvio-aluviales se consideran los siguientes subpaisajes:

- Abanicos, es una forma generada por la acumulación de fragmentos de material fino a medio con gravas y rocas, transportadas desde las partes altas de una ladera o cima y depositadas su porción inferior. La inestabilidad de los fragmentos de roca es la causa de este desprendimiento. Cuando llegan a un valle tienden a acumularse en forma de cono, denominados abanicos.
- Piedemonte, similares en su origen a la anterior, depositadas en la base de las laderas de montaña o colinas altas.

Colinas, se considera los siguientes subpaisajes:

- Colina baja, con altura menor a 80 m, relacionado al nivel medio del río.
- Colina media, con altura entre 80-150 m, relacionado al nivel medio del río.
- Colina alta, con altura entre 150-300 m, relacionado al nivel medio del río.
- Lomada, con altura menor de 20 m, respecto al nivel de base local, la pendiente está entre 8-15% y presentan cimas mayormente redondeadas.

Montañas, independiente de su naturaleza litológica, se considera los siguientes subpaisajes:

- Cimas de montaña, parte superior de la montaña o de una cadena de montaña.
- Laderas de montañas, parte lateral de las montañas.

c. Elementos del paisaje

Se definen las formas de tierra en base a criterios prácticos que constituyen, parte o todas, las limitaciones para el uso y/o manejo de estas tierras tales como el rango de pendiente, relieve, grado de inundación, fragmentos gruesos, drenaje y otros.

Las terrazas son a nivel de elemento de paisaje:

- Terrazas con relieve plano, la pendiente es menor de 2%.
- Terrazas con relieve ondulado presenta superficies cóncavas y convexas.

- Terrazas con relieve disectado, presenta segmentos hídricos profundos en la superficie.

Terrazas bajas son consideradas a nivel de elementos del paisaje:

- Terraza baja inundable, cuando la superficie es cubierta por agua todos los años durante la estación lluviosa.
- Terraza baja no inundable, cuando la superficie no es cubierta por agua en la estación lluviosa o puede ser cubierta en los años en que la precipitación es de mayor intensidad.

Terrazas medias y altas:

- Terrazas con buen drenaje.

Colinas, independiente de su altura, la intensidad de la disección, presencia de segmentos hídricos profundos, es considerado para agruparlas, a nivel de elementos del paisaje en:

- Colina ligeramente disectada, tienen presencia de disectación ligera (pocas). Se relaciona con la pendiente 15-25%, para colinas bajas.
- Colina moderadamente disectada, tiene presencia de disectación media (moderada). Se relaciona con la pendiente 25-50%, para colinas bajas y altas.
- Colina fuertemente disectada, tiene presencia de disectación alta. Se relaciona con la pendiente 50-75% para colinas bajas y altas.

Laderas y cimas de montaña, de cualquier naturaleza litológica, se considera el relieve y la pendiente de la ladera, en datos porcentuales, como limitación para el uso y manejo y para identificarlas como:

- Ladera fuertemente inclinada, pendiente 8-15%.
- Ladera moderadamente empinada, pendiente 15-25%.
- Ladera empinada, pendiente 25-50%.
- Ladera muy empinada, pendiente 50-75%.
- Ladera extremadamente empinada más de 75%.

Las Tablas 43 y 44 muestran el resumen de las características fisiográficas de las cuencas Anya y Mchique respectivamente donde se visualiza que el mayor porcentaje del área (28.96%) corresponde al paisaje de colinas con elementos de paisaje de Colinas bajas Moderadamente Empinada, con pendientes de 15-25% en la cuenca Anya.

Tabla 43: Características fisiográficas de la cuenca Anya

Paisaje	Sub paisaje	Elementos del paisaje	Rango pend. (%)	Símb.	Área (Km ²)	% área
Área Urbana	Área Urbana	Área Urbana	0-4	A	1.43	2.98
Colinas	Colinas Bajas	Colinas Bajas Moderadamente Empinadas	15-25	D	13.91	28.96
Colinas	Colinas Medias	Colinas Medias Empinadas	25-50	E	0.70	1.45
Montañas	Cimas de Montañas	Cimas de Montañas Moderadamente Empinadas	15-25	D	1.21	2.51
Montañas	Laderas de Montañas	Laderas de Montañas Empinadas	25-50	E	10.55	21.97
Planicies	Planicie Coluvio Aluvial	Piedemonte Fuertemente Inclinados	8-15	C	11.38	23.69
Planicies	Planicie Aluvional	Terrazas Bajas Inundables	0-4	A	0.38	0.78
Planicies	Planicie Aluvional	Terrazas Medias	0-4	A	8.48	17.65
T O T A L					48.03	100.00

Para la cuenca Mchique obtenemos que un 60.7% del área corresponde a Laderas de Colinas Altas Empinadas con pendientes de 25-50%. La Figura 51 contiene el mapa fisiográfico de la zona de estudio.

Tabla 44: Características fisiográficas de la cuenca Mchique

Paisaje	Sub paisaje	Elementos del paisaje	Rango pend. (%)	Símb	Área (Km ²)	% área
Colinas	Colinas Altas	Laderas de Colinas Altas Empinadas	25-50	D	17.32	60.7
Colinas	Colinas Altas	Laderas de Colinas Altas Moderadamente Empinadas	15-25	D	3.16	11.1
Colinas	Colinas Altas	Laderas de Colinas Altas Muy Empinadas	50-75	F	4.04	14.1
Planicies	Planicie Aluvional	Terrazas Bajas Inundables	0-4	A	0.01	0.1
Planicies	Planicie Aluvional	Terrazas Medias	0-4	A	0.56	1.9
Planicies	Planicie Coluvio Aluvial	Piedemonte Moderadamente Inclinados	4-8	B	1.93	6.8
Planicies	Planicie Fluvioglacial	Fondo de Valle Fluvioglacial	4-8	B	1.44	5.1
Ríos	Ríos	Ríos	0-4	A	0.08	0.3
T O T A L					28.55	100.0

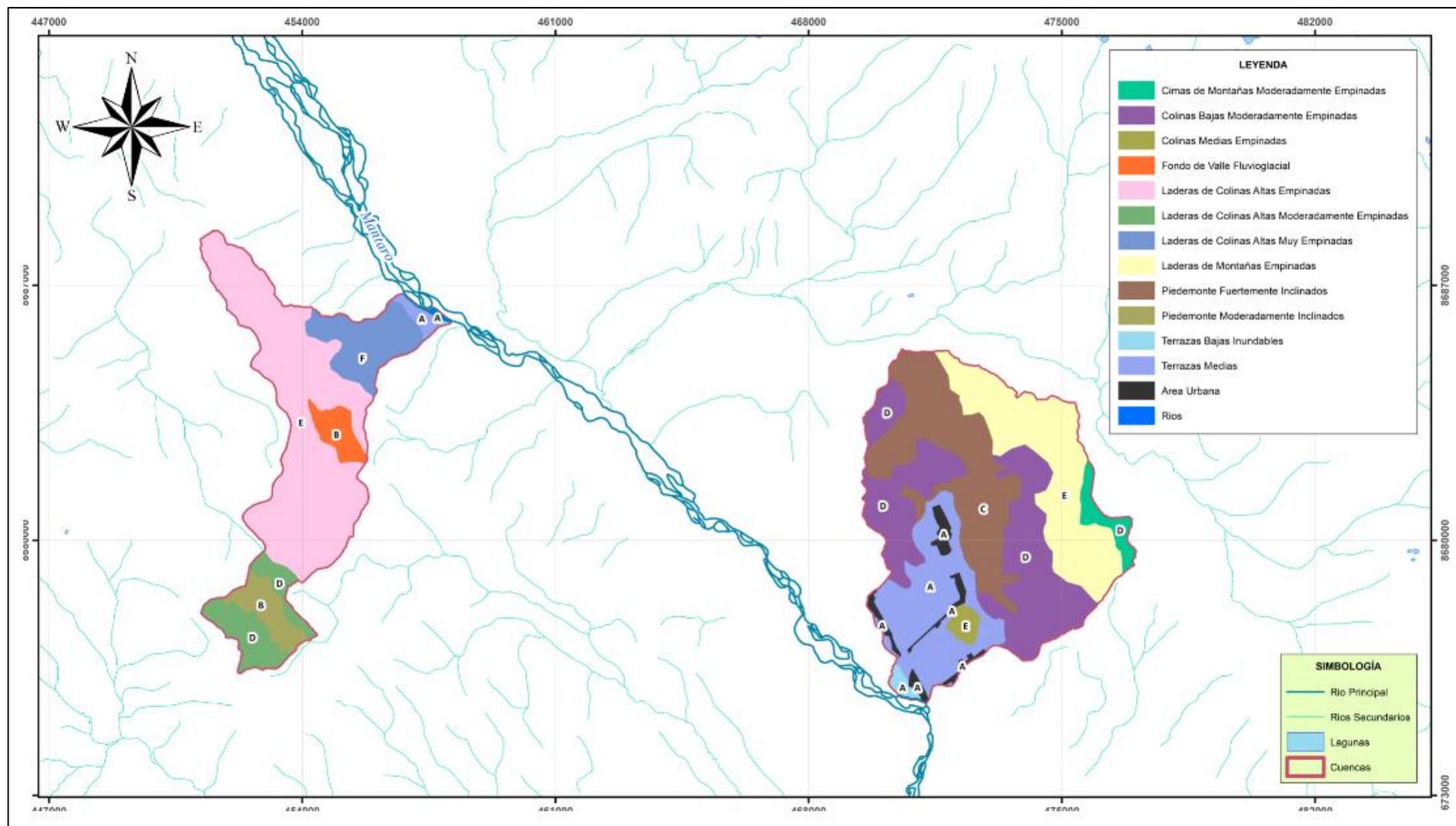


Figura 54: Mapa fisiográfico de la zona de estudio

4.1.3. Características geológicas

La geología de la región Junín es propia de los Andes, encontrándose rocas que van desde el Precámbrico hasta el Cuaternario. La variabilidad litológica de la región, muestra el cambio de paleoambientes desde la Cordillera Occidental hasta el Llano Amazónico, lo que acompañado de la actividad tectónica han configurado la morfología actual de los Andes. La distribución geográfica de las rocas sedimentarias se caracteriza por estar agrupadas de acuerdo a su edad. En efecto, en la Cordillera Occidental y en la zona de Altiplanicies, las rocas sedimentarias más abundantes corresponden a las calizas del Grupo Pucará, a las areniscas del Grupo Goyllarisquizga y las calizas marinas del Cretácico, que están intruidas por cuerpos subvolcánicos y plutónicos del Paleógeno-Neógeno. En la Cordillera Oriental las rocas más abundantes son las rocas metamórficas del Complejo Metamórfico del Marañón y las secuencias marinas continentales de los grupos Ambo Tarma y Copacabana.

La geología de la cuenca Anya está conformada por unidades litoestratigráficas como la formación Concepción, la formación Chambará con terrazas fluvio-glaciares, el grupo Mitu, además de la presencia de rocas ígneas como los porfiroides. Por otro lado, la cuenca Mchique, está conformada por unidades litoestratigráficas como la formación Chambará, depósitos fluvio-glaciares del cuaternario, la serie basal de la formación Chambará, formación Aramachay, la formación Condorsinga y la formación Concepción. A un nivel macro, estas formaciones constituyen el Grupo Pucará, cuya descripción se transcribe de la Memoria Descriptiva de la Geología de Junín hecha por el Gobierno Regional de Junín 2015:

a. Grupo Pucará (TrsJi-pu)

La litología de la serie inferior de esta unidad, está básicamente representada por calizas intercaladas con proporciones subordinadas de arenisca y lutitas; ocasionalmente se encuentran lentes de evaporitas y horizontes de conglomerados, las calizas se presentan masivas o en bancos gruesos bien estratificados de 0.30 a 1.0 m de grosor; son generalmente detríticas con contenido de numerosos fragmentos de fósiles: lamelibranquios y crinoideos en pobre estado de conservación. A menudo son bituminosas, en corte fresco presentan un color gris oscuro, mientras que en superficies meteorizadas adoptan una coloración blanquecina. En la parte más orientales, casi todos los niveles contienen nódulos de chert alargados en el sentido de la estratificación. Las lutitas son mayormente gris oscuras, laminadas y

endurecidas se presentan en capas delgadas de algunos centímetros hasta bancos mayores de 1m., las areniscas son gris blanquecinas y amarillentas, de grano medio a grueso, a menudo calcáreas que están generalmente asociadas con calizas arenosas, cineritas y conglomerados, los conglomerados de colores rojo y verde característicos, están compuestos por cantos heterométricos de rocas volcánicas englobados en matriz fina, los horizontes de evaporitas están constituidos principalmente por yeso y anhidrita, asociadas a sal común.

El Grupo Pucará, tiene un grosor estimado entre 500 y 1,000 m, se depositó en un ambiente marino, correspondiente a aguas marinas mal oxigenadas (condiciones euxínicas) poco profundas; la presencia de areniscas y demás sedimentos elásticos, especialmente del sector inferior de la secuencia, revelan influencias de medios continentales durante la depositación, de igual manera, el alto contenido de sílice de las calizas y la presencia de cineritas indican la ocurrencia de actividad volcánica durante su depositación.

- **Formación Chambará (Trs-ch)**

Los cherts son comunes y se ubican paralelamente a las capas, llegando a agruparse en estratos continuos con superficies nodulosas muy irregulares, que forman a veces conjuntos de varios metros de grosor. También se notan geodas de calcita, que son esféricas y de varios centímetros de diámetro.

- **Formación Aramachay (Ji-a)**

Por lo general, la Formación Aramachay está pobremente expuesta, al corresponder a taludes cultivados que separan los dos crestones Chambará y Condorsinga. Sin embargo, es fácil de identificar por su color grisáceo, que se intemperiza a tonos beige hasta morados, y por la presencia de nódulos cálcicos discoidales, en tal forma que constituye una unidad-guía para el mapeo.

- **Formación Condorsinga (Ji-c)**

La formación tiene un grosor que varía entre 500 y 1,500 m. Consiste de calizas en bancos regulares cuyo grosor varía comúnmente entre 0.2 y 1 m, pudiendo

llegar excepcionalmente a 3 m. En su parte media y superior, también hay dolomitas y las lutitas son escasas. Los cherts están comunes en la parte inferior, donde pueden formar lechos continuos, o concreciones cuya frecuencia decrece cuando se sube en la secuencia. La Figura 55 contiene la distribución de cada una de las unidades litoestratigráficas pertenecientes a ambas cuencas.

4.1.4. Características edafológicas

Los suelos de la cuenca del río Anya presentan un pH que varía entre 3.8 a 6.6, lo cual muestra predominancia de suelos ácidos. Además, el porcentaje de materia orgánica (MO) de los suelos varía entre 1.7% - 5.9% para los suelos del distrito de Quilcas y Saño, respectivamente. Respecto a los suelos de la cuenca Mchique están conformados principalmente por arenas y limos variando su clasificación textural de franco arenosa a franco- arcillo-arenosa. Los suelos presentan un pH que varía entre 4.9 a 7.9 correspondiente a suelos alcalinos y ligeramente ácidos. El porcentaje de materia orgánica varía entre 3.0 a 6.69% (Tablas 45 y 46).

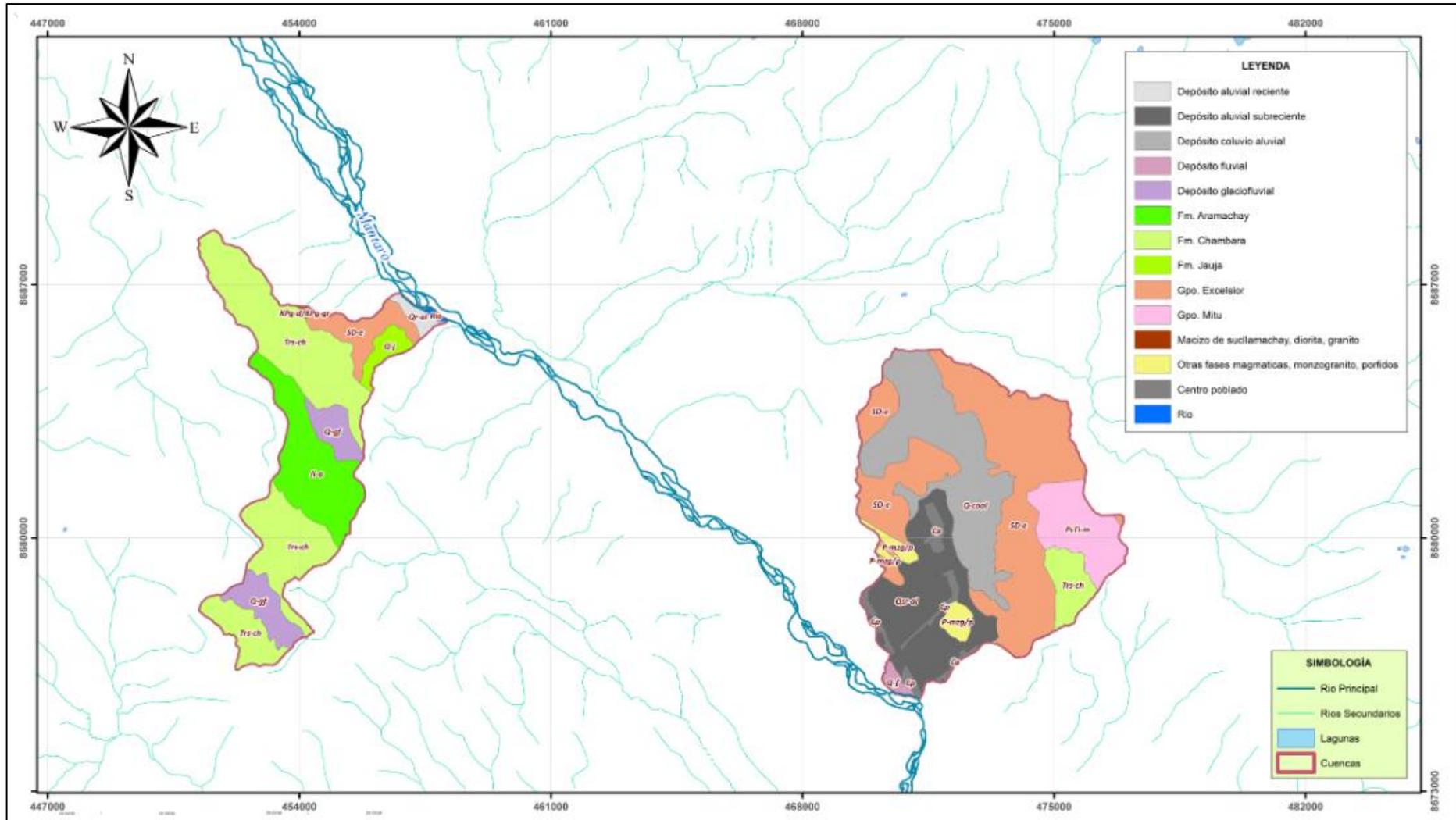


Figura 55: Mapa geológico de la zona de estudio

Tabla 45: Resumen de las características edáficas de los suelos de la cuenca Anya

Nombre de suelos	Taxonomía de suelos	Profundidad	Textura	Perm.	Área(km ²)
Area Urbana	Area Urbana Typic Ustorthents-Fluventic	No utilizado	No utilizado	No utilizado	1.43
Acobamba-Andamarca	Haplustepts Typic Ustorthents-Lithic	Profundo Profundo -	Franco	Moderada Mod.	11.38
Acobamba-Runatullo	Ustorthents	Superficial	Franco Arcillo arenoso	Lenta	14.60
Santa Rosa- Huaytapallana	Typic Cryorthents-Lithic Cryorthents Fluventic Haplustepts-Typic	Mod. profundo - Superficial	Franco arenosos - Arenosa	Moderada	11.76
Andamarca-Acobamba	Ustorthents	Profundo	Franco	Moderada	8.48
Sensa	Typic Udifluvents	Profundo	Franco arenosos	Moderada	0.38
T O T A L					48.03

Tabla 46: Resumen de las características edáficas de los suelos de la cuenca Mchique

Nombre de suelo	Taxonomía de suelos	Profundidad	Textura	Perm.	Área(km ²)
Rios	Rios Typic Ustorthents-Fluventic	-	No utilizado	No utilizado	0.08
Acobamba-Andamarca	Haplustepts	Profundo	Franco	Moderada	1.44
Santa Rosa-Virgen de las Nieves	Typic Cryorthents-Typic Haplocryepts	Mod. Profundo - Superficial	Franco arenosos	Moderada	1.93
Acobamba-Canchayllo	Typic Ustorthents-Lithic Calcustepts Lithic Ustorthents-Lithic	Profundo - Superficial	Franco Arcillo arenoso	Mod. lenta	17.32
Runatullo-Canchayllo	Calcustepts Fluventic Haplustepts-Typic	Superficial	Franco arenosos	Moderada	4.04
Andamarca-Acobamba	Ustorthents	Profundo	Franco	Moderada	0.56
Santa Rosa- Huaytapallana	Typic Cryorthents-Lithic Cryorthents	Mod. Profundo - Superficial	Franco arenosos - Arenosa	Moderada	3.16
Sensa	Typic Udifluvents	Profundo	Franco arenosos	Moderada	0.01
T O T A L					28.55

La Figura 56 contiene la distribución de los tipos de suelos de ambas cuencas.

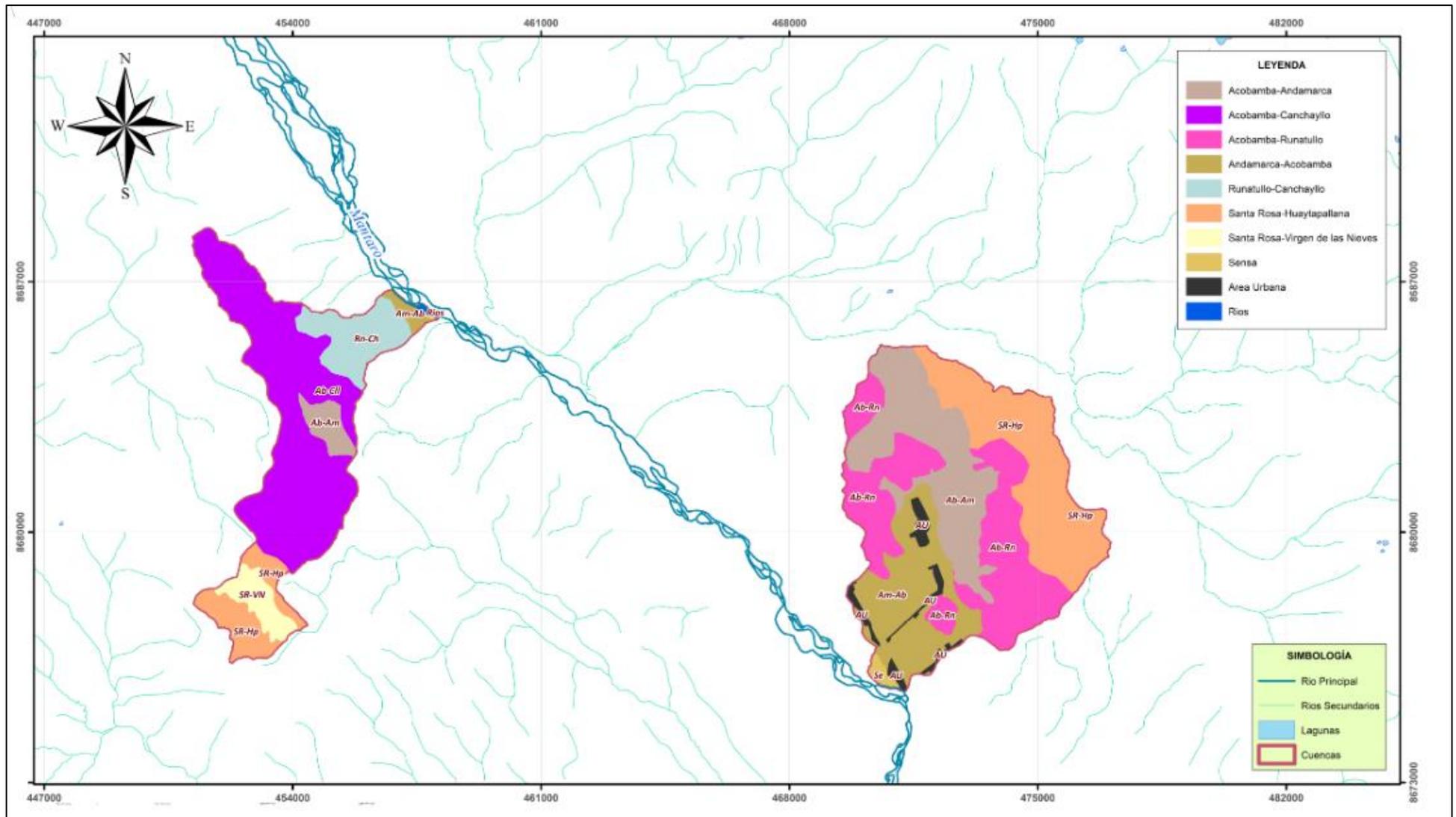


Figura 56: Mapa edafológico de la zona de estudio

4.1.5. Cobertura vegetal de las cuencas de estudio

4.1.5.1. Descripción de la cobertura vegetal

Respecto a la descripción de la cobertura vegetal de las cuencas de estudio, en ambas cuencas la vegetación es escasa, donde existe un predominio de arbustos entre las que se destacan especies silvestres propias de las zonas altoandinas y valles interandinos. Entre los principales árboles figuran el queñual, la tara, el quishuar, el aliso y el eucalipto y entre los arbustos se puede encontrar a retama, el mutui y la chilca negra (Grados 2012). En la región Junín a la escala de reconocimiento (1/100 000), se ha determinado las siguientes formaciones vegetales:

a. Herbazales

Constituido por especies de hierbas anuales, entre ellas los pajonales, bofedales y gramadales de puna. Está constituido por una asociación de pastos, pajonales, generalmente concurren en laderas de colina o de montaña, en lugares donde el suelo no está muy bien desarrollado y existe afloramiento de material rocoso o la presencia de escarpes.

- **Herbazal erguido**

Constituido principalmente por pajonales de los géneros *Festuca*, *Stipa* y *Calamagrostis*. También están presentes especies asociadas a cuerpos de agua, como el caso de los Totorales y Juncales, con especies del género *Typha sp.* (Totora), y *Scirpus sp* (Junco).

- **Herbazal rastrero**

Constituido principalmente por especies de poaceas (pastos) de hábito rastrero, como las del género *Distichia sp.*

b. Matorral

Está constituido por una diversidad de especies de porte mediano denominados matorrales, generalmente se ubican en la serranía esteparia de la región de Junín.

c. Áreas intervenidas por el hombre

- **Cultivos**

Son zonas por lo general ubicadas en llanuras, o en andenería, en las cuales se cultivan diversos productos. Son áreas deforestadas por el hombre con fines

agrícolas o de aprovechamiento de madera. Asimismo, en ambas cuencas se desarrolla una agricultura predominantemente extensiva, destinada al autoconsumo por la agricultura de secano, debido a la poca infraestructura hidráulica existente, existiendo unas cuantas áreas bajo riego por gravedad. Es así que, dentro de los cultivos más representativos se tiene: papa, maíz, cebada, habas, olluco, avena, desarrollados de forma extensiva según la altitud a lo largo de las dos cuencas.

d. Áreas con escasa o nula vegetación

- Poblados

Son áreas usadas para vivienda en la cual, existe poca vegetación.

4.1.5.2. Digitalización de la cobertura vegetal de las cuencas de estudio

En un principio, se utilizó la cobertura vegetal en base a la ZEE de la región Junín, la que a su vez empleó las imágenes satelitales Landsat 5TM del 2010, sin embargo, fue necesario realizar la actualización de la cobertura vegetal para ambas cuencas, en este caso a través de la compra de imágenes del satélite Planescope con fecha octubre 2019 (con mejor resolución respecto a la anterior).

Para la generación temática se ha tenido en cuenta los tipos de vegetación y uso de suelos de la ZEE de la región Junín empleando la técnica de la clasificación visual la cual consiste en que los polígonos de una primera fecha sirvan de referencia para interpretar las imágenes de las fechas posteriores, modificando únicamente aquellos segmentos en donde se visualicen cambios para disminuir los errores de posición y de clasificación (López *et al.* 2019).

A continuación, se adjunta la tabla comparativa de la variación de cobertura vegetal de las cuencas Anya y Mchique entre el año 2010 y 2019 (Tabla 47 y 48), que en la literatura científica es la Tasa de Cambio (TC) (FAO 1996) cuya fórmula es la siguiente:

$$TC = \left[\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \right] * 100 \quad \text{Ec. 131}$$

Donde, TC = tasa de cambio, S_1 = superficie de la fecha 1, S_2 = superficie de la fecha 2, n = número de años entre las dos fechas. Un valor positivo de TC indica ganancia de superficie, mientras que un valor negativo indica pérdida.

En la cuenca Anya, se puede verificar el crecimiento de la zona urbana (casas, veredas y pistas asfaltadas) con una TC de 6.24%, las plantaciones forestales muestran una TC positiva de 5.28% (es decir, no hay deforestación, por el contrario, en Anya se ha estado reforestando en los últimos nueve años) y se han ocupado las áreas de herbazales y matorrales, por los que este tipo de cobertura, han tenido TCs negativas. En la cuenca Mchique existió un incremento de los cultivos, estableciéndose casas rurales, asimismo se puede verificar al 2019 reforestación porque se puede verificar la existencia de 61 has de plantaciones forestales (que en el 2010 no existían).

Tabla 47: Tasa de cambio de cobertura vegetal, cuenca Anya (2010 – 2019)

Cobertura vegetal	2010		2019		Tasa de cambio (%)
	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	
Centros Poblados	1.43	2.97%	2.46	5.12%	6.24%
Cultivos	19.01	39.58%	19.90	41.44%	0.51%
Herbazal	15.36	31.97%	12.51	26.05%	-2.25%
Matorral	6.54	13.61%	4.10	8.53%	-5.06%
Plantación Forestal	5.70	11.87%	9.06	18.87%	5.28%
TOTAL	48.03	100.00%	48.03	100.00%	

Tabla 48: Tasa de cambio de cobertura vegetal, cuenca Mchique (2010 – 2019)

Cobertura vegetal	2010		2019		Tasa de cambio (%)
	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	
Centros Poblados			0.43	1.51%	
Cultivos	14.67	51.38%	16.73	58.58%	1.47%
Herbazal	11.39	39.89%	10.12	35.46%	-1.30%
Matorral	2.49	8.72%	0.67	2.33%	-13.64%
Plantación Forestal			0.61	2.12%	
TOTAL	28.55	100.00%	28.55	100.00%	

La Figura 57 y 58 contienen la distribución espacial de la cobertura vegetal de las cuencas de estudio en dos tiempos $t_1 = 2010$ y $t_2 = 2019$ en donde se pueden verificar los cambios sufridos en el período.

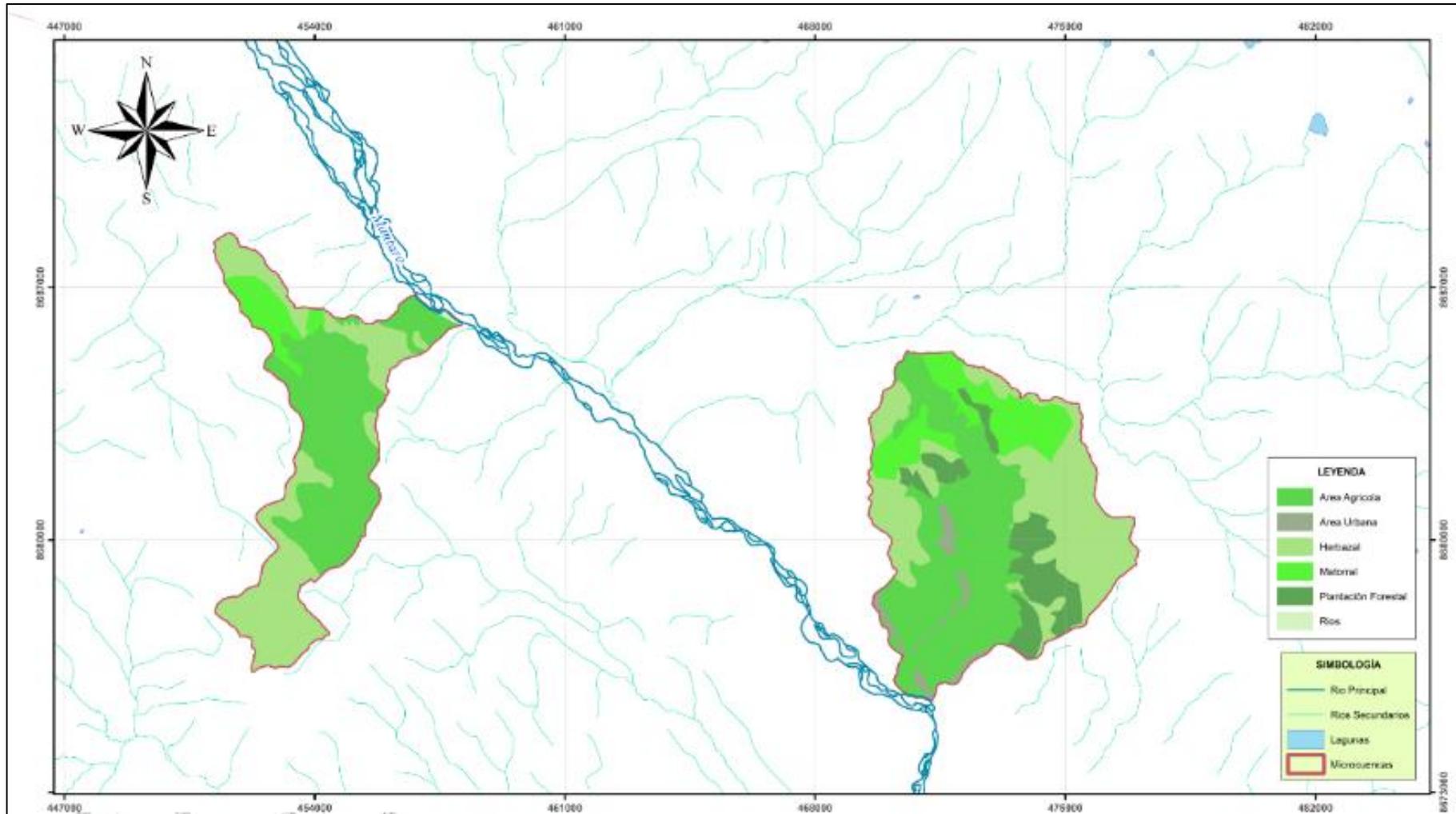


Figura 57: Mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio elaborado en base a la ZEE (imágenes Landsat 2010)

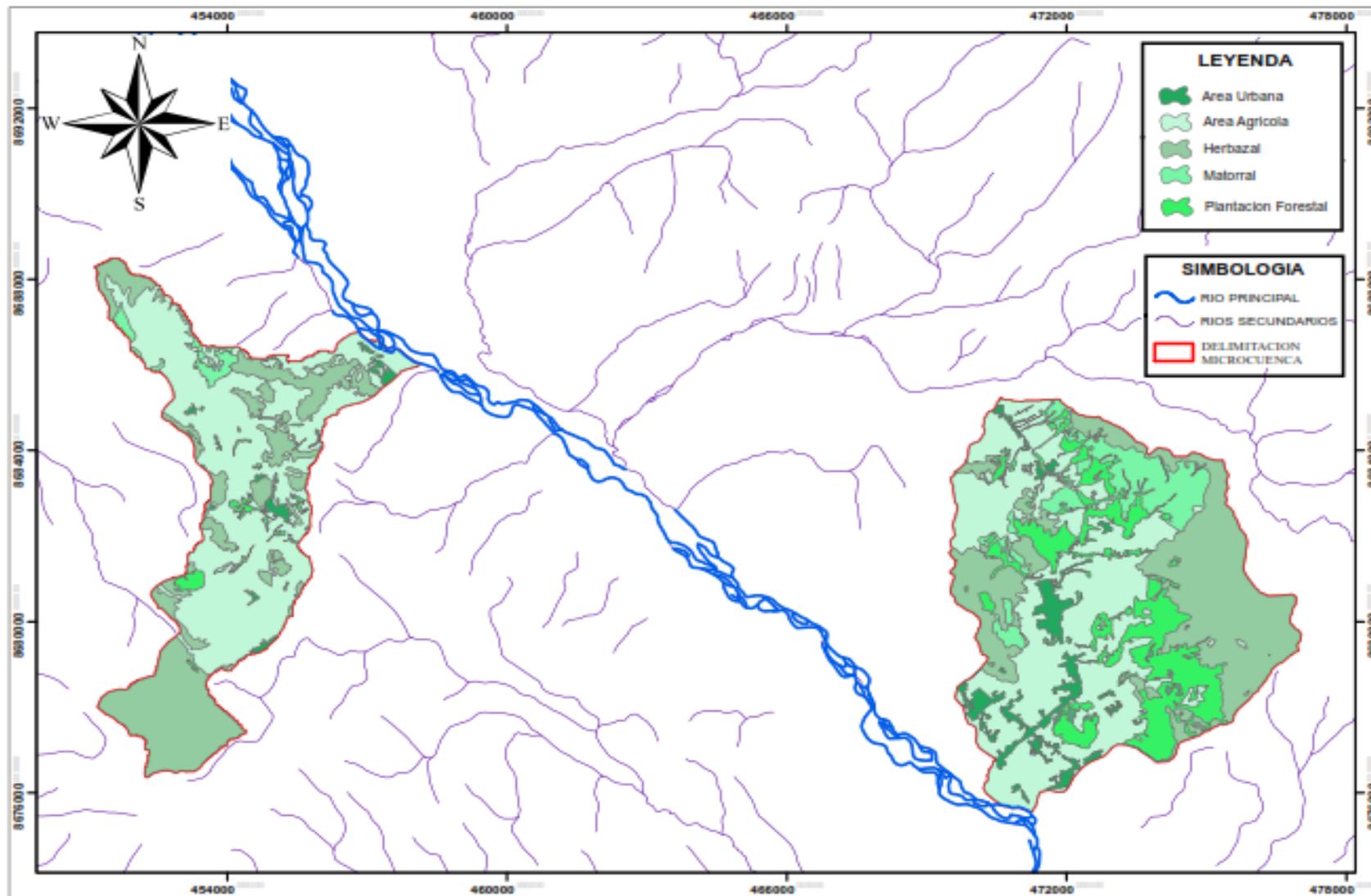


Figura 58: Mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio actualizado con imagen del satélite PlanetScope 2019

4.1.6. Características de los suelos según su Capacidad de Uso Mayor (CUM)

La Capacidad de Uso Mayor (CUM) es un sistema de clasificación que permite caracterizar los suelos en el ámbito nacional de acuerdo a su potencial, determinando su capacidad e identificando sus limitaciones, todo ello dentro del contexto agrario. Es decir, agrupa a los suelos de acuerdo a su aptitud natural para producir en forma constante, bajo tratamientos continuos y usos específicos, con el objetivo de asignar a cada unidad de suelo su uso y manejo más apropiado (tablas 49, 50 y 51).

Tabla 49: Descripción de símbolos – CUM - característicos de la zona de estudio

Capacidad de Uso Mayor de las Tierras	Descripción	Símbolo
A	Aptas para cultivos en limpios, de calidad baja, limitados por su clima (temperaturas bajas, semiáridos), suelos moderadamente profundos, drenaje bueno, textura media. Pendiente A y B (0-8%)	A3sc
	Aptas para cultivos en limpios, de calidad baja, limitados por su suelo, topografía (fuertemente inclinado) y su clima (temperaturas bajas, semiáridos). Posee suelos moderadamente profundos, drenaje bueno, textura media. Pendiente D (15-25%)	A3sec
	Aptas para cultivos en limpios, de calidad baja, la mayor limitación es el problema de inundación periódica, suelos moderadamente profundos, drenaje moderado y textura franca. Ligeramente ácidas y con una regulara dotación de materia orgánica. Comprende a la Unidad de Suelos: Sensa en pendiente A (0-4%).	A3si
X	Tierras de Protección, con limitaciones referidas al relieve muy irregular con pendientes muy pronunciadas y al factor edáfico, suelos superficiales. Pendientes F y G (50 a más de 75%).	Xse
	Asociación de Tierras para Pastos asociado a Tierras de Protección. Pendientes C, D y E (8-50%).	P3se-Xse
P-X	Tierras para Pastos de baja calidad agrologica asociado a Tierras de Protección limitada por suelo y erosión. Comprende a la unidad de suelo de Santa Rosa-Canchayllo en pendiente D (15-25%).	P3sec-Xse
	Asociación de Tierras para Pastos asociado a Tierras de Protección. Comprende a las unidades de Suelos: Santa Rosa-Huaytapallana en pendientes D, E y F (15 - 75%).	P3sec-Xsec

Tabla 50: Descriptivo de la Capacidad de Uso Mayor (CUM) de la cuenca Anya

CUM	Descripción CUM	Área (km ²)	% Área
A3sec-Xse	Tierras aptas para cultivos en limpio con calidad agrológica baja, limitada por suelo, erosión y clima - Tierras de Protección, limitada en suelo y erosión.	13.91	28.95
AU	Area urbana.	1.43	2.98
A3sc	Tierras aptas para cultivos en limpio con calidad agrológica baja, limitada por suelo y clima.	19.86	41.35
A3si	Tierras aptas para cultivos en limpio con calidad agrológica baja, limitada por suelo e inundación.	0.38	0.78
P3se-Xse	Tierras aptas para pastos con calidad agrológica baja, limitada por suelo y erosión - Tierras de Protección, limitada en suelo y erosión.	0.70	1.45
P3sec-Xsec	Tierras aptas para pastos con calidad agrológica baja, limitada por suelo, erosión y clima - Tierras de protección, limitada en suelo, erosión y clima.	11.76	24.49
T O T A L		48.03	100.00

Tabla 51: Descriptivo de la Capacidad de Uso Mayor (CUM) de la cuenca Mchique

CUM	Descripción_CUM	Área (Km ²)	% Área
P2sc	Tierras aptas para pastos con calidad agrológica media, limitada por suelo y clima.	1.93	6.77
Rios	Ríos.	0.08	0.29
Xse	Tierras de protección, limitada en suelo y erosión.	4.04	14.14
A3sc	Tierras aptas para cultivos en limpio con calidad agrológica baja, limitada por suelo y clima.	2.00	7.02
A3si	Tierras aptas para cultivos en limpio con calidad agrológica baja, limitada por suelo e inundación.	0.01	0.05
P3se-Xse	Tierras aptas para pastos con calidad agrológica baja, limitada por suelo y erosión - Tierras de Protección, limitada en suelo y erosión.	17.32	60.66
P3sec-Xsec	Tierras aptas para pastos con calidad agrológica baja, limitada por suelo, erosión y clima - Tierras de protección, limitada en suelo, erosión y clima.	3.16	11.07
T O T A L		28.55	100.00

La distribución espacial de las características de CUM en ambas cuencas, pueden verificarse en la Figura 59.

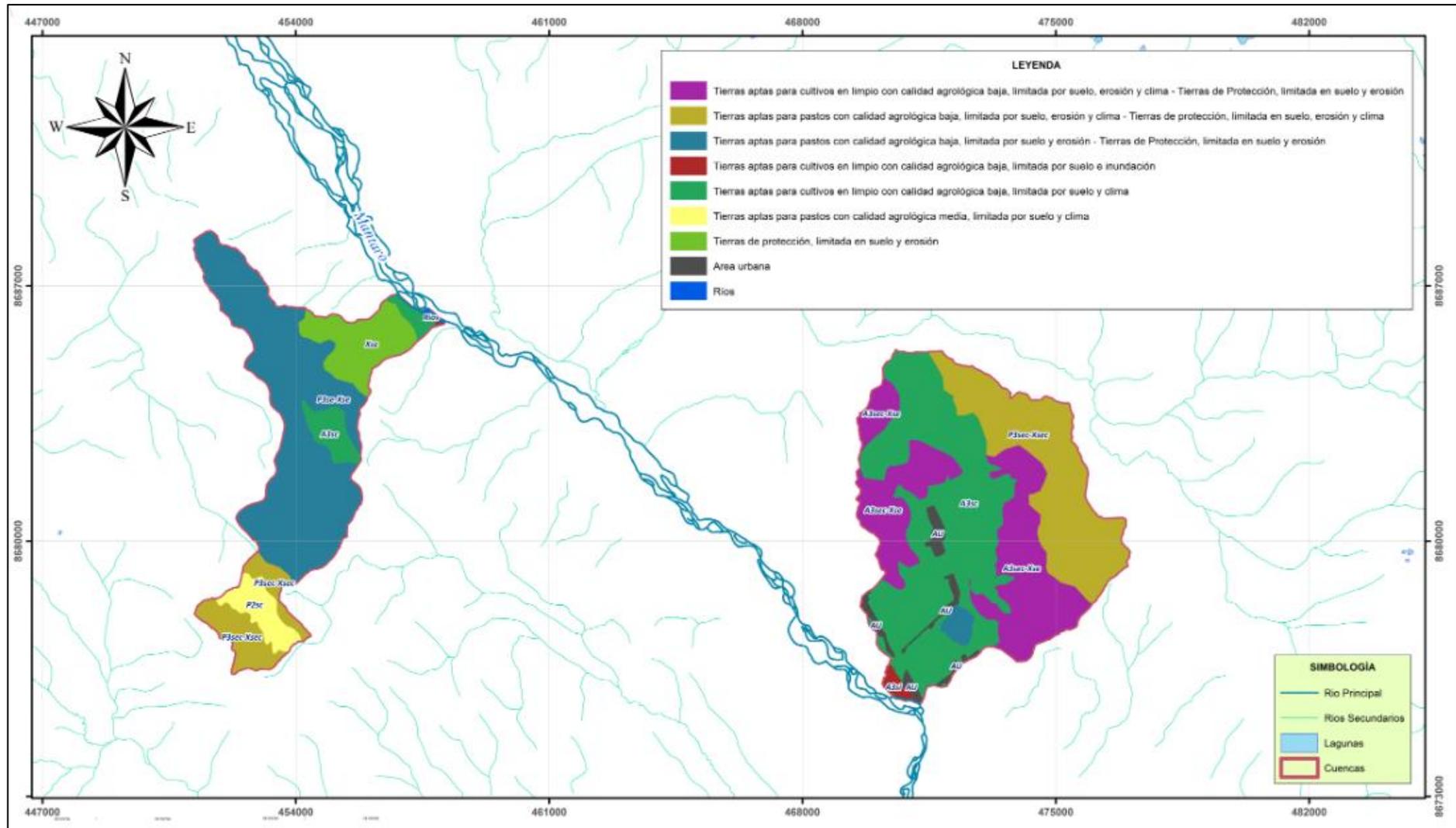


Figura 59: Capacidad de Uso Mayor de los suelos de la zona de estudio

4.1.7. Características ecológicas

Las zonas de vida distinguidas obtenidas del Mapa Ecológico del Perú, que fue elaborado en base al Diagrama Bioclimático de Holdridge. Este diagrama es de forma triangular y está estructurado mediante líneas oblicuas que indican valores de precipitación total anual, las cuales se interceptan con líneas horizontales que indican valores promedios de biotemperatura, relacionados directamente con los pisos altitudinales y latitudinales, produciendo de dicha interacción polígonos denominados Zonas de Vida. En la Figura 60 podemos ver el Diagrama Bioclimático de Holdridge.

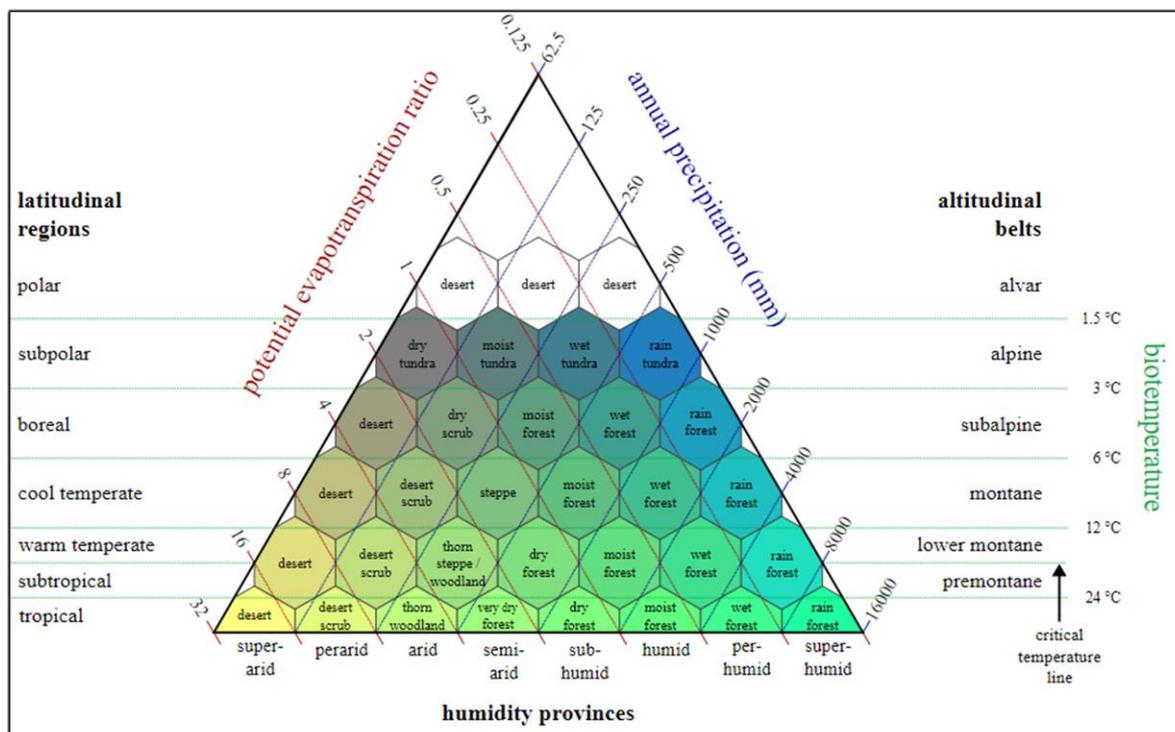


Figura 60: Diagrama Bioclimático del sistema Holdridge

FUENTE: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cb/Lifezones_Pengo.svg

Las Zonas de Vida están relacionadas con las llamadas “Provincias de Humedad” ubicadas en el otro extremo del triángulo, las cuales se originan de la relación entre la evaporación potencial total por año y la precipitación promedio anual. Cada Provincia de Humedad involucra a un grupo determinado de zonas de vida, con sus propias características térmicas y pluviales, las cuales se extienden a través de pisos altitudinales desde el nivel del mar hasta la porción más elevada de la cordillera de los Andes, determinando a su paso una gran diversidad de tipos de vegetación.

La Figura 58 muestra las zonas de vida de ambas cuencas de estudio. La descripción de las características de cada zona de vida se ha tomado del Estudio Climático y Zonas de Vida realizado en el 2015 por el Gobierno Regional de Junín que a continuación se detalla por zona de vida definida para las cuencas de estudio:

a. Páramo Húmedo Subalpino Tropical (ph –SAT)

Es la segunda unidad de mayor cobertura en la sierra de Junín. Se encuentra principalmente en la provincia de Tarma, Yauli y Chupaca, y en las demás provincias se encuentra en áreas pequeñas y localizadas. Esta zona de vida se encuentra a una altitud entre los 4000 a 4500 msnm, y su biotemperatura media anual se encuentra entre 3.0 a 6.0 °C. Su régimen de precipitación está entre 800 a 1000 mm de lluvia total anual.

b. Páramo muy Húmedo Subalpino Tropical (pmh-SAT)

Este tipo de zona de vida caracteriza la mayor parte de la sierra del departamento de Junín. Cubre las zonas altoandinas de las provincias de Yauli, Junín y Huancayo. Esta zona de vida se encuentra a una altitud entre los 4000 a 4500 msnm, y su biotemperatura media anual se encuentra entre 3.0 a 6.0 °C. Su régimen de precipitación se encuentra entre 1000 a 1200 mm de lluvia total anual.

c. Bosque Húmedo Montano Tropical (bh-MT)

Esta zona de vida es muy particular de algunas zonas altoandinas de la sierra de Tarma, Chanchamayo, Junín, Concepción y Huancayo. Se encuentra a una altitud entre los 3000 a 4000 msnm, y su biotemperatura media anual se encuentra entre 6.0 a 11.0 °C. Su régimen de precipitación se encuentra entre 800 a 1200 mm de lluvia total anual.

d. Bosque Seco Montano Bajo Tropical (bs – MBT)

Esta zona de vida se ubica principalmente en los valles andinos de las provincias de Chanchamayo, Tarma, Jauja y Huancayo. Esta unidad caracteriza la parte baja del Valle del Mantaro. Esta zona de vida se encuentra a una altitud entre los 2000 a 3000 msnm, y su biotemperatura media anual se encuentra entre 12.0 a 17.0 °C. Su

régimen de precipitación se encuentra entre 500 a 1000 mm de lluvia total anual.

Tabla 52: Porcentaje correspondiente a cada zona de vida - cuenca Anya

Símbolo	Descripción	Altitud (msnm)	Área (km²)	% Área
ph - SAT	Páramo Húmedo Subalpino Tropical	4000-4500	4.30	8.95
bs - MBT	Bosque Seco Montano Bajo Tropical	2000-3000	31.32	65.22
bh - MT	Bosque Húmedo Montano Tropical	3000-4000	12.40	25.83
T O T A L			48.03	100.00

Tabla 53: Porcentaje correspondiente a cada zona de vida - cuenca Mchique

Símbolo	DESCRIP	Altitud (msnm)	Área (km²)	% Área
pmh - SAT	Páramo muy Húmedo Subalpino Tropical	4000-4500	8.07	28.26
bs - MBT	Bosque Seco Montano Bajo Tropical	2000-3000	20.48	71.74
T O T A L			28.55	100.00

4.1.8. Características climáticas

En las cuencas Anya y Mchique la zona de vida predominante es el Bosque Seco Montano Bajo Tropical (bs-MBT) con un 65.22% y 71.74% respectivamente (Tablas 52 y 53) y dicha predominancia tiene correspondencia con la cantidad de precipitación de la zona de vida (Figura 61). Asimismo, el clima en la zona es variado debido a la diversidad de pisos altitudinales existentes, sin embargo, se podría decir que, en promedio para ambas cuencas le corresponde un clima Templado Frío. Las precipitaciones son estacionales y ocurren entre los meses de noviembre a abril y esporádicamente entre mayo y octubre. Las precipitaciones se hacen más significativas a partir de octubre hasta alcanzar valores máximos en febrero. Los meses de máximas precipitaciones son enero, febrero y marzo, en abril la precipitación disminuye bruscamente, para luego alcanzar los valores mínimos en junio. Este patrón de precipitación se cumple en un gran porcentaje de las estaciones dentro de la zona de estudio. El 83% de la precipitación anual ocurre entre los meses de octubre a abril, de los cuales el 48% están distribuidos casi equitativamente entre los meses de enero, febrero y marzo.

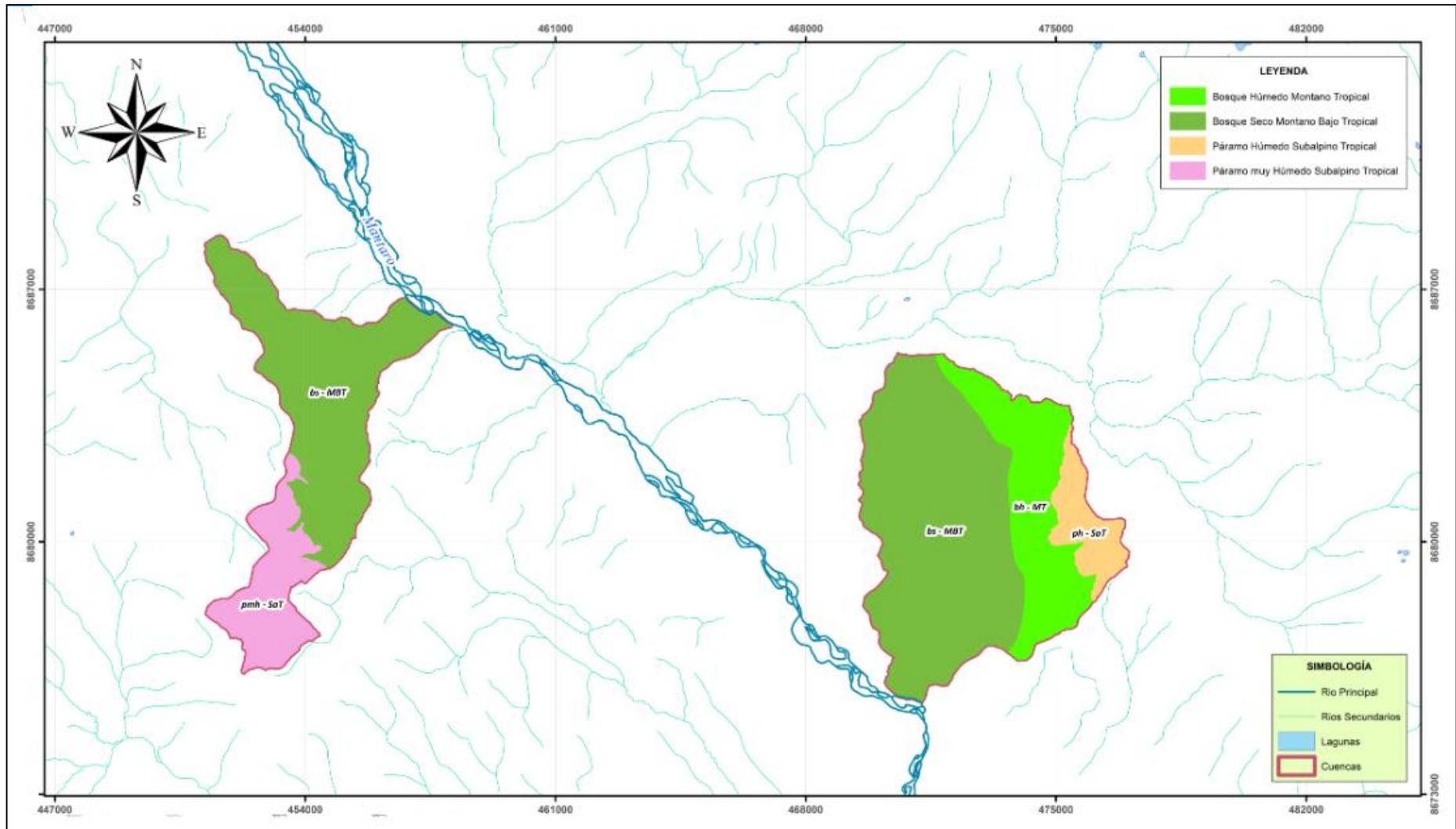


Figura 61: Zonas de vida de la zona de estudio

4.1.9. Características socioeconómicas de la zona de estudio

4.1.9.1. Aspectos demográficos

Los datos demográficos de la zona de estudio se obtuvieron de los Planes de Desarrollo Concertados (PDCs) de los municipios que están comprendidos dentro de las cuencas Anya y Mchique, entre ellos Ingenio, Quilcas y Saño, para la cuenca Anya y el distrito de Sincos, para la cuenca Mchique. Con una tasa de crecimiento de 1,9 por ciento anual en el periodo 1940-2007, la Región Junín alcanzó en 2007 una población de 1,2 millones de habitantes, lo que representa el 4,5 por ciento de la población total del país. De esta población, el 67 por ciento es urbana y el 33 por ciento, rural (Guabloche & Saldarriaga 2013).

La Tabla 54 contiene la tasa de crecimiento poblacional de los distritos comprendidos en las cuencas Anya y Mchique correspondientes a la región Junín, donde se puede ver que la tasa de crecimiento poblacional promedio en los distritos de la cuenca Anya está en descenso a diferencia de la tasa regional y la tasa de la cuenca Mchique que está en ascenso, esto se explica por la migración de los pobladores de Anya a la ciudad de Huancayo debido a su cercanía. Sin embargo, es importante destacar, que los pobladores de Anya desarrollan muchas de sus actividades en San Jerónimo de Tunán, pequeña ciudad que está colindante a la carretera central a 16 km de la ciudad de Huancayo, existiendo una gran actividad comercial en el lugar.

Tabla 54: Tasa de crecimiento poblacional en la zona de estudio

Cuenca	Distrito	N° habitantes		Tasa de crec. y/o dec. (%)	Promedio
		2011	2015		
Anya	Ingenio	2642	2503	-5.26%	-1.66%
	Quilcas	4195	4186	-0.21%	
	Saño	4006	4026	0.50%	
Mchique	Sincos	4738	4795	1.20%	1.20%

FUENTE: INEI. Censos Nacionales de Población y Vivienda (1993) (2007).

a. Población urbana y rural

Según el PDC del distrito de Saño (2013), la tendencia observada en las últimas décadas es la intensificación del proceso de urbanización, reflejado en un mayor incremento de la población urbana frente a un fuerte decrecimiento de la población

rural. Esta situación se presenta porque el distrito está ubicado cerca de la ciudad de Huancayo, donde las actividades económicas se han visto dinamizadas, y, donde se encuentran las principales instituciones públicas, universidades y centros de enseñanza, que ofrecen oportunidades de empleo y educación para los pobladores. Este proceso de urbanización se refleja en las cifras obtenidas de los últimos Censos de Población y Vivienda, donde el porcentaje de población rural ha ido en descenso y más del 80% de la población vive en áreas urbanas. Según la tendencia se podría esperar que, en los próximos años, la población del distrito de Saño llegue a ser prácticamente urbana, debido al acelerado proceso de urbanización que consiste en un proceso constante y permanente de ocupación de las áreas agrícolas con usos urbanos. Este mismo escenario es de esperarse en los otros distritos por su cercanía a la ciudad de Huancayo y la presencia de la carretera central.

La urbanización se desarrolla tanto en Huancayo como en las capitales de provincias y distritos; sin embargo, en la capital de la región se desarrolla más intensamente este fenómeno como resultado de la migración de poblaciones rurales, y la disminución de la actividad agrícola y ganadera. La ciudad de Huancayo crece invadiendo cada vez más las áreas agrícolas; muchas de ellas, comuneras. Algunas comunidades campesinas cercanas a la ciudad de Huancayo ya forman parte del continuum urbano como es el caso de Cajas Chico, Pilcomayo, Sicaya, entre otras.

Junín es una región clave porque es una zona de tránsito para toda la zona Centro del país, conectando la Costa, Sierra y Selva en menos de 371 kilómetros con la ruta de menor distancia hacia la Selva Central desde la capital del Perú y constituyendo una zona de paso para el transporte terrestre desde Lima hacia Huánuco, Pasco, Ayacucho y Huancavelica. Asimismo, Junín es una de las regiones con mayor número de kilómetros de red vial por cada mil kilómetros cuadrados de superficie, con un nivel que duplica el promedio nacional y similar al de Lima, sin embargo, existen restricciones para la interconexión de esta región con el resto del país.

La principal vía de conexión de Junín con la capital es la Carretera Central, una vía transversal de 174 kilómetros que parte desde Lima y llega hasta la ciudad de La Oroya en Junín donde se conecta con la Longitudinal de la Sierra Norte que permite

llegar a otros departamentos de la Sierra Central. Sin embargo, esta importante vía se encuentra saturada, lo que genera frecuentemente congestionamientos y accidentes, además de mucha lentitud, alargando el tiempo de viaje, debido a que la mayoría de los vehículos que transitan por dicha carretera son camiones de carga que exceden las 40 toneladas (Guabloche & Saldarriaga 2013).

4.1.9.2. Nivel de pobreza

En Junín, la pobreza total ha disminuido de 44,4 por ciento en 2007 a 23,7 por ciento en 2012. Esta reducción de 21 puntos porcentuales ha permitido a la región mostrar una tasa ligeramente menor al promedio nacional. La reducción de la pobreza es producto del crecimiento económico que ha permitido un mayor incremento del empleo y los ingresos (Guabloche & Saldarriaga 2013). Sin embargo, la incidencia de la pobreza de la población en la zona de estudio, afecta, en promedio a un 39.7% y la pobreza extrema alcanza un 13.2%, con un 60.3% en condición de no pobre, los que están constituidos mayoritariamente por aquellos que han logrado tener un empleo permanente y laboran en la ciudad de Huancayo principalmente (Tabla 55). La situación de pobreza se refleja también en la incidencia (52%) de niños menores de 05 años sin seguro de salud.

Tabla 55: Condición de pobreza en la zona de estudio

Cuenca	Distrito	Pobres (%)			No pobre (%)	Prom. No pobres /cuenca
		Total	Extremo	No extremo		
Anyá	Ingenio	40.2	14.2	26.0	59.8	53.2
	Quilcas	58.0	19.3	38.8	42.0	
	Saño	42.2	12.9	29.3	57.8	
Mchique	Sincos	18.3	6.4	11.9	81.7	61.7
	Leonor Ord.	41.1	14.5	26.6	58.9	
	Aco	55.6	22.6	33.1	44.4	
Prom.		42.6	14.9	27.6	57.4	

FUENTE: INEI (2010).

Para tener una imagen más amplia del desarrollo, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) elaboró el índice de desarrollo humano (IDH). Este índice tiene como fin, determinar el nivel de desarrollo que tienen los países, no solo para conocer los ingresos económicos mediante el acceso a una canasta básica, sino para evaluar si el país aporta a sus ciudadanos un ambiente donde puedan desarrollar mejor o peor su proyecto y condiciones

de vida. El IDH analiza 3 dimensiones: la dimensión salud analiza la esperanza de vida al nacer; la dimensión de educación mide la alfabetización adulta y los años de escolaridad; la dimensión del nivel de vida se mide por el PBI per cápita. Los resultados del IDH se presentan mediante valores entre 0 y 1, siendo la calificación más baja 0 y 1 la más alta. En esa línea, el PNUD clasifica a los países en tres grandes grupos: países con alto desarrollo humano (IDH mayor de 0.80), países con medio desarrollo humano (IDH entre 0.50 y 0.80) y países con bajo desarrollo humano (IDH menor de 0.50) ((SINEACE 2017). En el 2012, el PNUD realizó un IDH para Perú por provincias y distritos. El IDH de Perú fue de 0.5058 y de Junín 0.4539, reflejando que como país se obtiene un desarrollo humano medio y como región Junín se tuvo un bajo desarrollo humano (SINEACE 2017). En los distritos que abarcan las cuencas de estudio el IDH es mayor a 0.5 en todos los casos.

4.1.9.3. Actividades económico productivas

Según la Dirección Regional de Agricultura, la economía de la región Junín se sostiene fundamentalmente en el sector agropecuario. En el año 2005, la actividad agrícola representó el 98.3%; mientras que, la producción pecuaria fue de 1.7%. Sin embargo, en los últimos tiempos la actividad agropecuaria ha disminuido progresivamente en proporción a años anteriores, dando paso a otras actividades económicas como la de industria manufacturera y comercio menor.

En la cuenca del río Mantaro, la actividad agrícola se desarrolla en aproximadamente 339,065 ha. de las cuales un 29% se encuentra bajo riego y el 71% es seco. En la zona sur de la cuenca se ubica la mayor cantidad de tierras agrícolas, 182,360.4 ha., que representan el 54% de la cuenca (72% en seco y 18% bajo riego), las mismas que se dedican a la producción de tuna, papa, cebada, olluco y oca. La zona central cuenta con 95,643 ha., (28% de la cuenca), de las cuales el 71% es seco y el 29% está bajo riego con cultivos importantes: papa, maíz, zanahoria, cebada, alfalfa, alcachofa. La zona norte de la cuenca cuenta aproximadamente con 60,862.6 ha. de tierras agrícolas (33% bajo riego y 67% en seco), dedicadas a la producción de maca, avena forrajera, papa, cebada, olluco y oca. Una característica de la tenencia de la tierra en la cuenca del río Mantaro es la existencia del minifundio (menos de 0.5 ha.) y la pequeña propiedad (más de 0.5 ha - 4.9 ha), representando ambos el 85.7% de productores.

La población económicamente activa ocupada en la actividad agropecuaria es de 54.6%. Superior a las registradas en otras actividades económicas de la cuenca del río Mantaro. La mayor concentración está en la zona sur de la cuenca (73.3%), seguida por la zona central (50.8%), mientras que, en la zona norte de la cuenca, sólo es de un 17.6%, pues es mayor la dedicación a la actividad minera y comercial.

El nivel de ingreso per cápita familiar registrado en la cuenca del río Mantaro es de S/. 200.10 nuevos soles, que es el 20% del costo de la canasta básica familiar estimado en S/. 1,000.00, la misma que sólo permite cubrir la necesidad básica de alimentación y no disponer de medios para hacer frente a emergencias ante las variaciones climáticas y fenómenos geológicos superficiales.

En el valle la ganadería lechera, es una actividad complementaria a la agricultura, pero que por especialización y rentabilidad viene reemplazando a la misma actividad agrícola. La ganadería en el valle del Mantaro y algunas zonas alto andinas, han alcanzado cierto nivel tecnológico, con la introducción de pastos cultivados y la utilización de la inseminación artificial en el mejoramiento ganadero y como consecuencia se ha visto un incremento de la producción lechera, siendo en promedio de 10 a 15 lts por animal. La producción es utilizada en la elaboración de quesos, mantequilla y yogurt, todos artesanalmente, siendo necesaria la implementación de una planta industrial de procesamiento de leche (ANA 2019).

Análisis de vulnerabilidad socioeconómica de las cuencas

Se realizó el análisis de la vulnerabilidad socioeconómica en el ArcMap 10.4 utilizando la base de datos de la ANA - nivel distrital, con capas en formato *shapefile* de: densidad demográfica, índice de desarrollo humano (para todos los distritos de la zona de estudio el IDH es mayor a 0.5), servicios de agua, desagüe y electricidad, así como carreteras, pistas, postas e instituciones educativas.

Para la obtención del mapa de vulnerabilidad socioeconómica, se formularon en principio, los submodelos de Unidades Sociales e Infraestructura Social, según el siguiente detalle:

Sub modelo de Unidades sociales (SMUS)

$$SMUS = 0.2(\text{Demografía}) + 0.2(\text{IDH}) + 0.2(\text{S. Agua}) + 0.2(\text{S. Des.}) + 0.2(\text{S. Elec.}) \quad \text{Ec. 132}$$

Sub modelo de Infraestructura social (SMIS)

$$SMIS = 0.4(\text{Vías}) + 0.3(\text{IIEE}) + 0.3(\text{Centros de Salud}) \quad \text{Ec. 133}$$

Luego se realizó la integración ponderativa de los dos submodelos para finalmente obtener el modelo de vulnerabilidad socioeconómica, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} MVS &= f(\text{SMUS}, \text{SMIS}) \\ MVS &= 0.50(\text{SMUS}) + 0.50(\text{SMIS}) \quad \text{Ec. 134} \end{aligned}$$

Donde:

MVS: Modelo de Vulnerabilidad Social

SMUS: Submodelo de Unidades Sociales

SMIS: Submodelo de Infraestructura Social

El Anexo 10 contiene el detalle de la valoración de la vulnerabilidad socioeconómica por cada variable, con lo cual se caracterizó y trabajó en la tabla de atributos de cada capa. La Figura 62 contiene el mapa de las cuencas con sus respectivos distritos y la Figura 63 muestra el mapa de vulnerabilidad socioeconómica de las cuencas resultado de la integración de los submodelos (Ec. 132 y Ec 133) y el modelo (Ec. 134). Viendo el mapa se aprecia que la cuenca Mchique tiene vulnerabilidad socioeconómica media y la cuenca Anya tiene vulnerabilidad socioeconómica media y baja, esto se puede explicar porque, en el caso de Anya es una cuenca que posee infraestructura de transporte (carreteras y vías asfaltadas) en gran parte de su territorio y, como se dijo anteriormente, colinda con San Jerónimo de Tunán ciudad cuya actividad económica principal es la orfebrería.

Es importante entender que la impermeabilización de las cuencas por la red vial y la construcción de casas tendrán una influencia importante en la modificación del coeficiente de escorrentía y, por ende, en la cantidad de escurrimiento dentro de las cuencas Anya y Mchique. Al respecto, es importante destacar que, con una adecuada planificación del

territorio a nivel de cuencas, es posible mantener e incluso aminorar los efectos derivados de la impermeabilización de suelos y el aumento de la escorrentía superficial, a través de una ordenación armónica del territorio, por ejemplo, respetando ciertas densidades de ocupación del suelo en áreas de borde con capacidad de retención de humedad o bien manteniendo los parches de vegetación natural en zonas húmedas o cursos de agua (Henriquez & Azócar 2006).

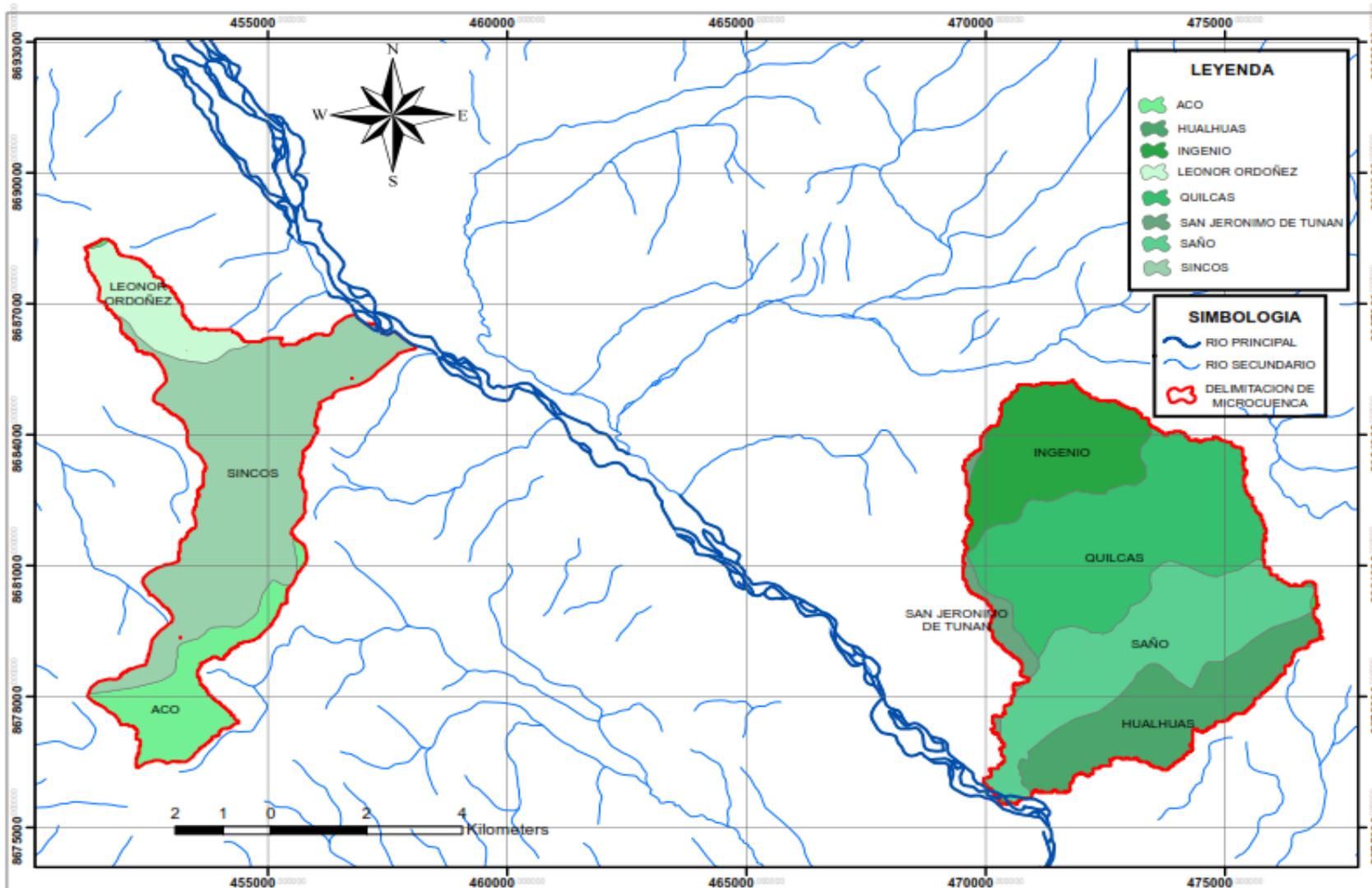


Figura 62: Mapa de los distritos correspondientes a las cuencas Anya y Mchique

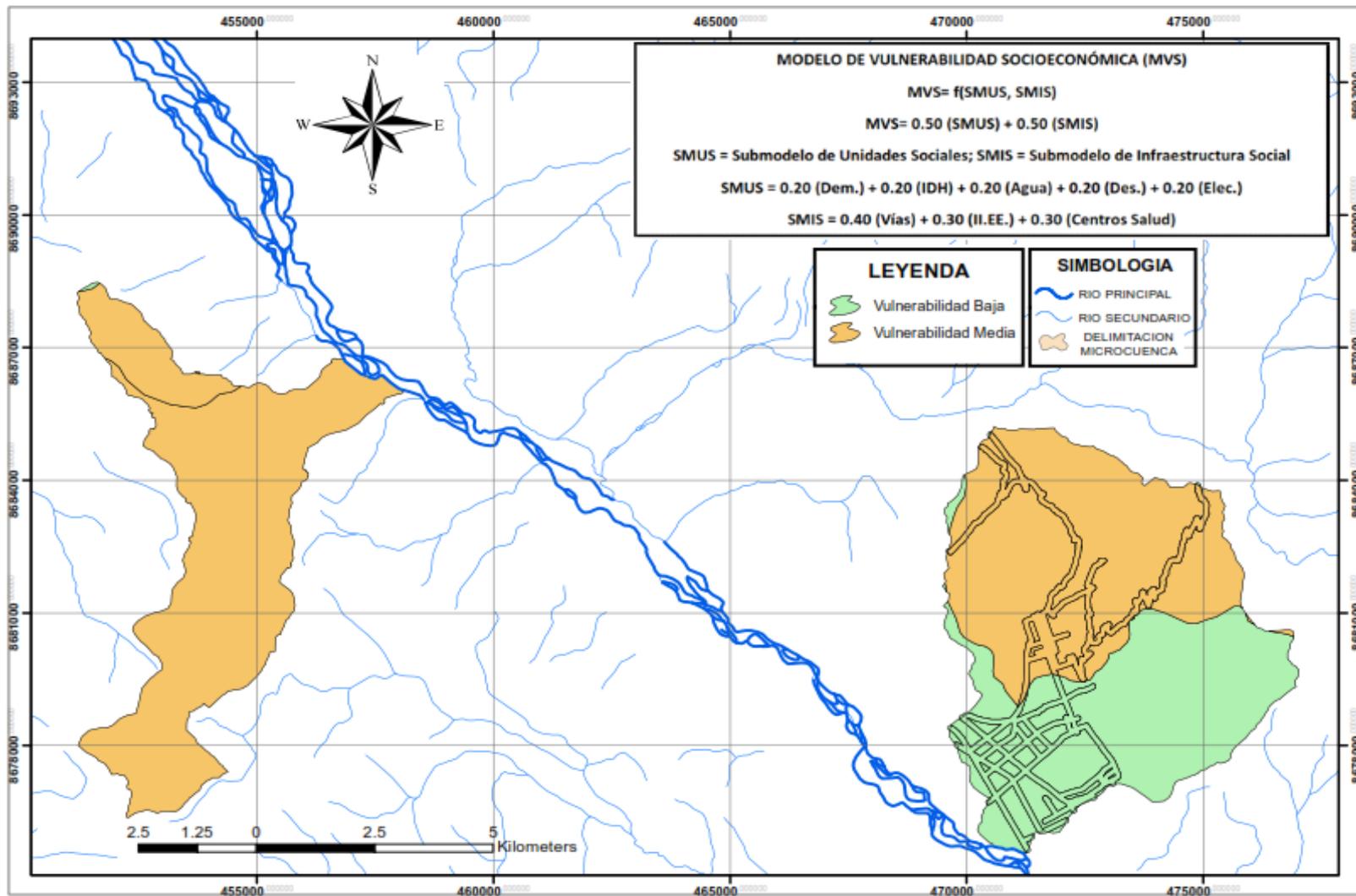


Figura 63: Mapa de vulnerabilidad socioeconómica de las cuencas de estudio

4.2. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO

La morfometría de las cuencas de estudio, Anya y Mchique, se analizó con información topográfica e hidrológica digitalizada a escala 1:100 000 del IGN. Se verificó la delimitación de la cuenca corrigiendo los detalles topográficos, para luego determinar los parámetros geomorfológicos los que sirven para explicar los efectos dinámicos de su comportamiento hidrológico. Los resultados preliminares de los parámetros de relieve de las cuencas, se obtuvieron con el programa Arc Map 10.4 de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y con ayuda complementaria de hojas de cálculo Excel. Las cuencas Anya y Mchique pertenecen a la sierra peruana y ambas poseen fuertes pendientes en sus nacientes que acentúan la escorrentía. La respuesta hidrológica de las cuencas está condicionada por los factores geomorfológicos calculados, correspondiéndole a la cuenca Mchique mayor torrencialidad cerca a su desembocadura, no así la cuenca Anya, cuya pendiente se va suavizando hasta su confluencia con el río Mantaro.

4.2.1. Parámetros de relieve

La cuenca Anya perteneciente a una cabecera de cuenca ubicada en el margen izquierdo del río Mantaro y que recibe aportes de agua de la precipitación que ocurre dentro de ella. El área total de la cuenca, hasta su confluencia con el río Mantaro es de 48.03 km², su perímetro es 31.59 km y la longitud del río principal es 11.3 km.

La cuenca Mchique pertenece a una cabecera ubicada, a diferencia de la cuenca Anya, en el margen derecho del río Mantaro, cuya área total hasta su desembocadura en el río Mantaro es 28.55 km², perímetro 39.33 km y longitud del río principal es 12 km aproximadamente.

a. Coeficiente de masividad (K_m)

Este índice toma valores altos en cuencas montañosas y bajos en cuencas llanas (Ec. 15). En la cuenca Anya, con una altura media igual a 3700 msnm y área de cuenca igual a 48.03 km², el coeficiente de masividad resultante es $K_m = 3700 / 48.03 = 77.04 \text{ m/km}^2$, que representa un relieve muy accidentado en la cuenca.

El coeficiente de masividad de la cuenca Mchique, con altura media igual a 3831.42

msnm y área de cuenca 28.55 km² es $C_m = 3831.42 / 28.55 = 134.2 \text{ m/km}^2$ que significa que la cuenca Mchique tiene un relieve muy accidentado, más que la cuenca Anya.

b. Curvas hipsométricas

La Figura 64 muestra la curva hipsométrica de la cuenca del río Anya, presenta valores altitudinales desde 3300 hasta los 4320 msnm. En la curva hipsométrica, el eje vertical Y representa las altitudes sobre el nivel del mar y en el eje horizontal X, el área acumulada relativa (%), ya sea arriba o debajo de la cota, cuyos datos se muestran en la Tabla 56.

Tabla 56: Áreas acumuladas por debajo y por encima de las cotas – Cuenca Anya

Altitud (msnm)	Áreas parciales		Áreas acumuladas			
	(km ²)	(%)	Por debajo (km ²)	Por debajo (%)	Por encima (km ²)	Por encima (%)
3256	0	0.0	0	0.0	48.03	100
3380	11.01	22.92	11.01	22.92	37.02	77.08
3500	5.49	11.43	16.5	34.35	31.53	65.65
3620	8.52	17.74	25.02	52.09	23.01	47.91
3740	8.38	17.45	33.4	69.54	14.63	30.46
3860	4.33	9.02	37.73	78.56	10.30	21.44
3980	3.61	7.52	41.34	86.07	6.69	13.93
4100	3.02	6.29	44.36	92.36	3.67	7.64
4220	1.87	3.89	46.23	96.25	1.80	3.75
4300	1.62	3.37	47.85	99.63	0.18	0.37
4320	0.18	0.37	48.03	100.00	0.00	0.00
TOTAL	48.03	100.0				

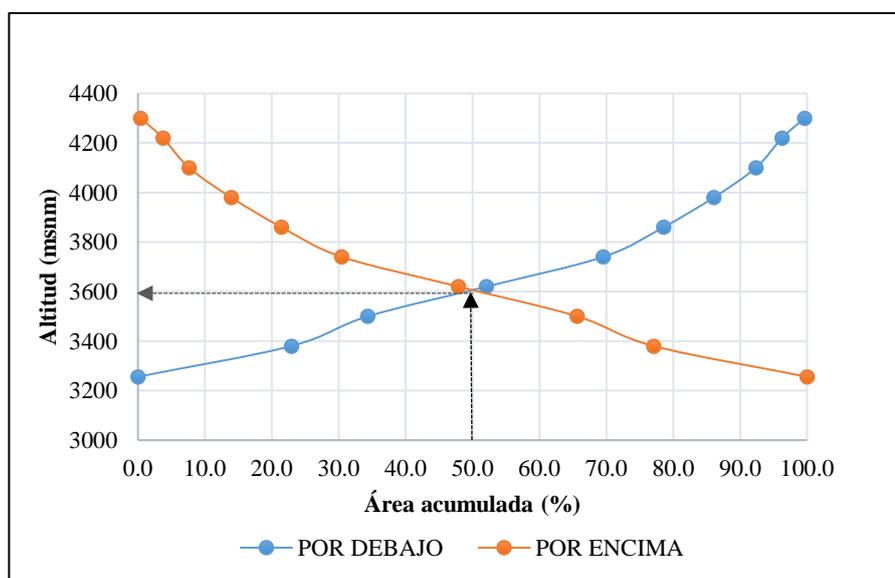


Figura 64: Curva hipsométrica de la cuenca del río Anya

De la curva hipsométrica se obtiene la Altitud mediana de la cuenca Anya que es igual a 3600 msnm. De la visualización de la curva hipsométrica de la cuenca Anya se deduce que la cuenca se encuentra en una etapa de madurez y equilibrio, con fase de río tipo 2 (o tipo B), representando una actividad erosiva media.

Tabla 57: Áreas acumuladas por debajo y por encima de las cotas – Cuenca Mchique

Altitud (msnm)	Áreas parciales		Áreas acumuladas			
	Km ²	(%)	Por debajo (Km ²)	(%)	Por encima (Km ²)	(%)
					28.55	100%
3260	0.89	0.03	0.89	3%	27.66	97%
3380	0.76	0.03	1.65	6%	26.9	94%
3500	0.98	0.03	2.63	9%	25.92	91%
3620	1.91	0.07	4.54	16%	24.01	84%
3740	5.84	0.2	10.38	36%	18.17	64%
3860	8.59	0.3	18.97	66%	9.58	34%
3980	6.43	0.23	25.4	89%	3.15	11%
4100	2.59	0.09	27.99	98%	0.56	2%
4220	0.56	0.02	28.55	100%	0	0%
TOTAL	28.55	100%				

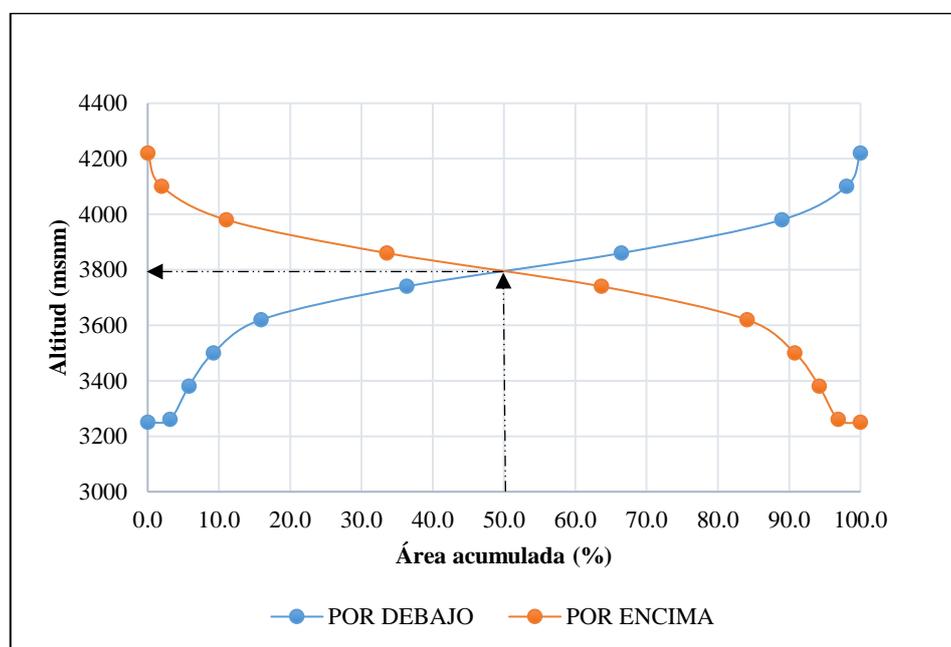


Figura 65: Curva hipsométrica de la cuenca del río Mchique

De la curva hipsométrica se obtiene la Altitud mediana de la cuenca Mchique que resulta

3800 msnm. Mirando la curva hipsométrica podemos afirmar que es una curva tipo 1, por lo que se deduce que la cuenca Mchique es una cuenca joven, con gran potencial erosivo y de alta actividad, donde se verifican alturas superiores a 3200 msnm (la más baja) hasta 4220 msnm (la más alta).

c. Histograma de frecuencia de altitudes

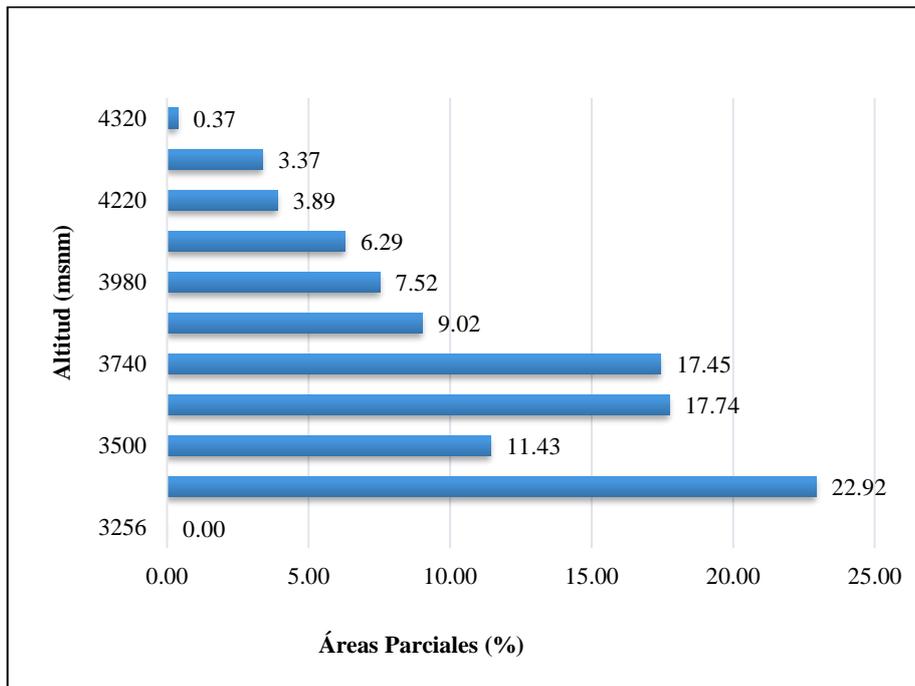


Figura 66: Histograma de frecuencia de altitudes de la cuenca Anya

De la Figura 66 podemos observar que la mayor frecuencia de altitud que se presenta en la cuenca Anya, corresponde a cotas mayores a 3256 msnm, aproximadamente un 23% se ubican a 3380 msnm. Un 35.5% de la frecuencia corresponde a cotas entre 3620 y 3740 msnm. En general se puede afirmar que un 70% del área de la cuenca, se encuentra por debajo de la cota 3740 msnm.

En la cuenca Mchique la cota 3860 msnm es la que se encuentra en un 30.09% del área. Cabe resaltar que la mayor parte de la cuenca (84%) presenta alturas superiores o iguales a 3740 msnm, lo que significa que la cuenca Mchique tiene un importante poder erosivo (Figura 67).

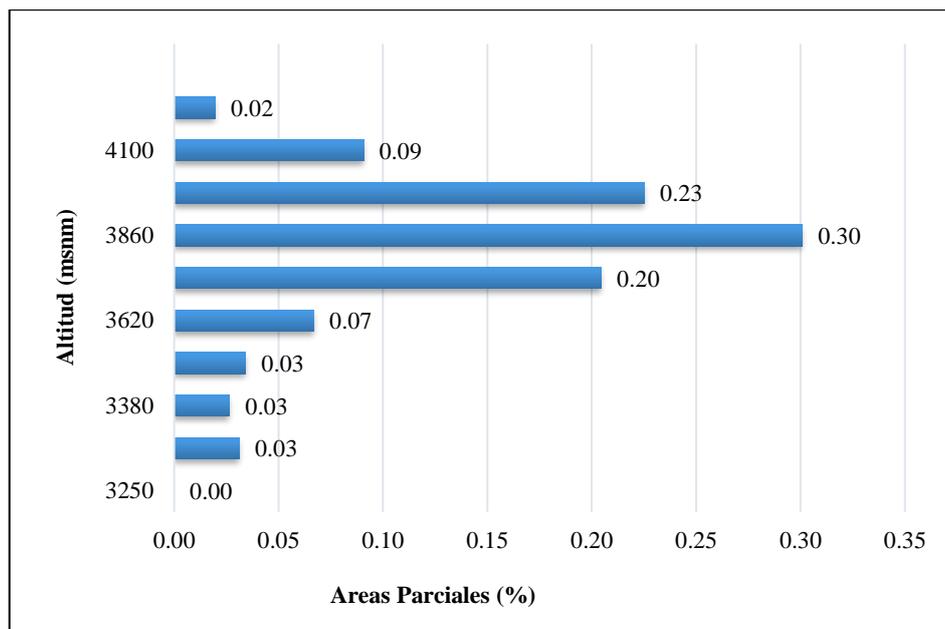


Figura 67: Histograma de frecuencia de altitudes de la cuenca Mchique

d. Cálculo de la altitud media ponderada (Altura media) de las cuencas de estudio

Para el cálculo de la altura media de la cuenca se utilizó el área relativa entre curvas de nivel (Tabla 58).

Tabla 58: Variables de cálculo de altura media - cuenca Ayna

ai	ci	ai*ci
0.00	3256	0.00
11.01	3380	37213.80
5.49	3500	19215.00
8.52	3620	30842.40
8.38	3740	31341.20
4.33	3860	16713.80
3.61	3980	14367.80
3.02	4100	12382.00
1.87	4220	7891.40
1.62	4300	6966.00
0.18	4320	777.60
48.03		177711.00

Utilizando la ecuación 16, y siendo que la sumatoria de los productos de las alturas por el área entre ellas igual a 177 711.00 (km² x msnm) y el área de la cuenca igual a 48.03 km², se obtiene la altura media ponderada de la cuenca Anya de la siguiente manera: $H = 177711.00 / 48.03 = 3700$ msnm.

A continuación, se muestra la Tabla 59 con las variables de cálculo de la altura media de la cuenca del río Mchique, donde se obtiene la altura media de la siguiente manera:
 $H = 109\,387.00 / 28.55 = 3831.42$ msnm.

Tabla 59: Variables de cálculo de la altura media de la cuenca Mchique

ai	ci	ai*ci
0.00	3250.0	0.00
0.89	3260.0	2901.40
0.76	3380.0	2568.80
0.98	3500.0	3430.00
1.91	3620.0	6914.20
5.84	3740.0	21841.60
8.59	3860.0	33157.40
6.43	3980.0	25591.40
2.59	4100.0	10619.00
0.56	4220.0	2363.20
28.55	Suma=	109 387.00

4.2.2. Parámetros de forma de las cuencas de estudio

a. Índice de compacidad (K_c) o índice de Gravelius

Cuanto más cercano esté el índice de compacidad a la unidad, se considera que la cuenca tiene una forma más circular y que por tanto es más compacta, y va aumentando conforme disminuye la compacidad. En el caso de Anya el coeficiente de compacidad se obtuvo mediante la fórmula 2.18 de la siguiente manera: $K_c = 0.28 \times (31.59 / \sqrt{48.03}) = 1.28$; de modo que podemos considerar que la cuenca Anya tiene forma un tanto oval y la compacidad no es muy alta.

Para la cuenca del río Mchique se tiene el perímetro igual a 39.33 km y área igual a 28.55 km², por lo tanto, el índice de compacidad de la cuenca del río Mchique se calculó así $K_c = 0.28 \times (39.33 / \sqrt{28.55}) = 2.06$, por lo que podemos considerar que la cuenca tiene una forma alargada y compacidad baja.

b. Factor de forma (K_f)

Siendo el área de la cuenca igual a 48.03 km² y la longitud del cauce principal igual a 11.3 km, el factor de forma correspondiente a la cuenca Anya se calculó mediante la ecuación 19 del marco teórico, de la siguiente manera: $K_f = 48.03 / (11.3)^2 = 0.376$ que según la Tabla 14, significa que la forma de la cuenca no es ni alargada ni ensanchada,

sino más bien en forma de pera.

En la cuenca Mchique, con área de cuenca igual a 28.55 km² y longitud del curso principal igual a 12 km, el factor de forma de la cuenca es $K_f = 28.55 / (12)^2 = 0.20$, que según la Tabla 14 es una forma Muy Alargada.

c. Relación de elongación (R_e)

Siendo el área de la cuenca Anya igual a 48.03 km² y su longitud máxima de un extremo al otro igual a 8.895 km, la relación de elongación según la ecuación 23 es: $R_e = 1.129 \times (\sqrt{48.03} / 8.895) = 0.88$. Esta relación de elongación describe un relieve más o menos pronunciado.

En la cuenca Mchique, el área de la cuenca es igual a 28.55 km² y la longitud máxima de la cuenca igual a 11.17 km, por lo que, la relación de elongación de la cuenca Mchique fue igual a $R_e = 1.129 \times (\sqrt{28.55} / 11.17) = 0.54$ (adimensional). La relación de elongación resultante: $R_e < 1$ implica una forma alargada de la cuenca Mchique.

d. Relación de circularidad (R_{ci})

La relación de circularidad tiene un valor unitario cuando la cuenca es circular y si la cuenca es cuadrada su valor será 0.785. La relación de circularidad en la cuenca Anya se calculó mediante la fórmula 2.24, siendo el área y el perímetro de la cuenca igual a 48.03 km² y 31.59 km respectivamente, la relación de circularidad es: $R_{ci} = (4 \times 3.1416 \times 48.03) / (31.59)^2 = 0.60$. Como los resultados de la relación de circularidad de la cuenca en estudio, no es 1 ni 0.785, se concluye que la cuenca no es circular, ni cuadrada.

La relación de circularidad de la cuenca Mchique se calculó de la siguiente manera: $R_{ci} = (4 \times 3.1416 \times 28.55) / 39.33 = 0.23$ que significa que la cuenca está lejos de ser circular.

e. Rectángulo equivalente de las cuencas

En la cuenca Anya, según los cálculos realizados con las ecuaciones 21 y 22 cuyo desarrollo fue el siguiente:

$$L = \sqrt{48.03} \left(\frac{1.27}{1.12} + \sqrt{\left(\frac{1.27}{1.12}\right)^2 - 1} \right) = 11.68 \text{ km}$$

$$l = \sqrt{48.03} \left(\frac{1.27}{1.12} - \sqrt{\left(\frac{1.27}{1.12}\right)^2 - 1} \right) = 4.11 \text{ km}$$

La longitud del lado mayor igual a 11.68 km y del lado menor igual a 4.11 km (Tabla 60).

Tabla 60: Variables de cálculo del rectángulo equivalente en la cuenca Ayna

Cota (msnm)	Area Parcial ai (km ²)	Ancho, ci (km)
3256	0.00	0.00
3380	11.01	2.68
3500	5.49	1.34
3620	8.52	2.07
3740	8.38	2.04
3860	4.33	1.05
3980	3.61	0.88
4100	3.02	0.73
4220	1.87	0.45
4300	1.62	0.39
4320	0.18	0.04
<i>Suma ci= L=</i>		11.68

En la cuenca Mchique, donde A = 28.55 km² y K_c = 2.06, se obtiene lo siguiente:

$$L = \sqrt{28.55} \left(\frac{2.06}{1.12} + \sqrt{\left(\frac{2.06}{1.12}\right)^2 - 1} \right) = 18.08 \text{ y } l = \sqrt{28.55} \left(\frac{2.06}{1.12} - \sqrt{\left(\frac{2.06}{1.12}\right)^2 - 1} \right) = 1.58$$

Los lados mayor y menor del rectángulo equivalente son: L=18.08 km y l=1.58 km (Tabla 61).

Tabla 61: Variables de cálculo del rectángulo equivalente en la cuenca Mchique

Cota msnm	Area Parcial ai (km ²)	Ancho, ci (km)
3250	0.00	0.00
3260	0.89	0.56
3380	0.76	0.48
3500	0.98	0.62
3620	1.91	1.21
3740	5.84	3.70
3860	8.59	5.44
3980	6.43	4.07
4100	2.59	1.64
4220	0.56	0.35
<i>Suma ci= L=</i>		18.08

4.2.3. Parámetros de drenaje y/o red hidrográfica

a. Orden de los ríos

Según Horton, el río Anya es de orden 3, como se aprecia en la Figura 68.

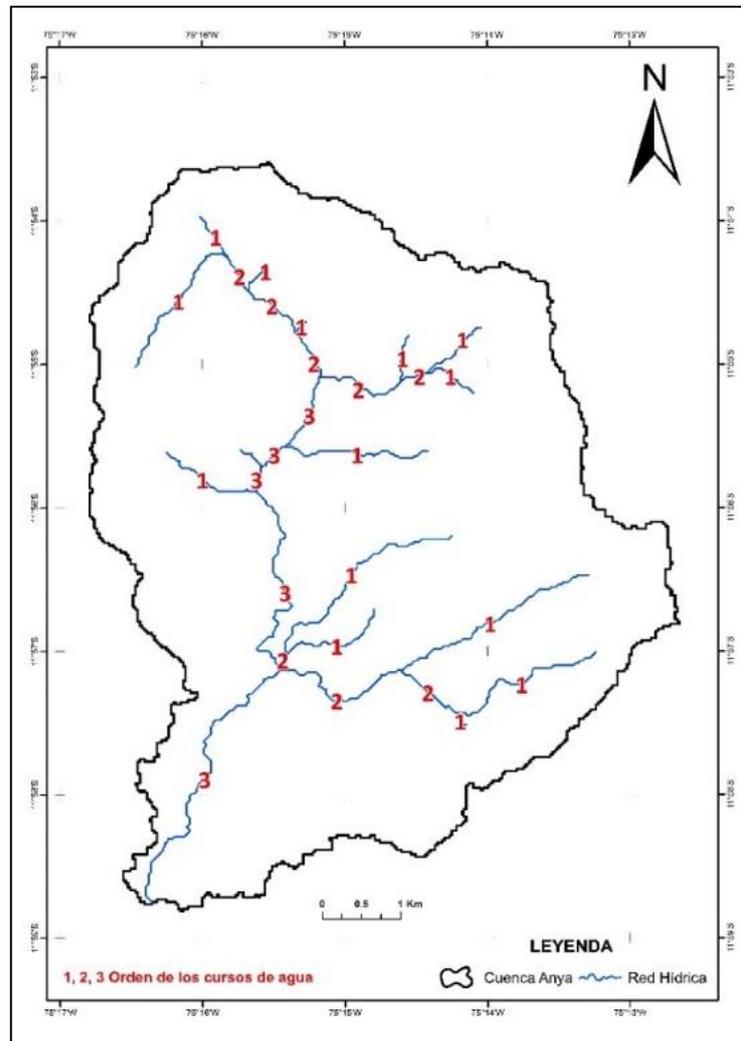


Figura 68: Orden de los ríos en la cuenca Anya

El orden de los ríos en la cuenca Mchique es 3, lo cual se puede observar en la Figura 69.

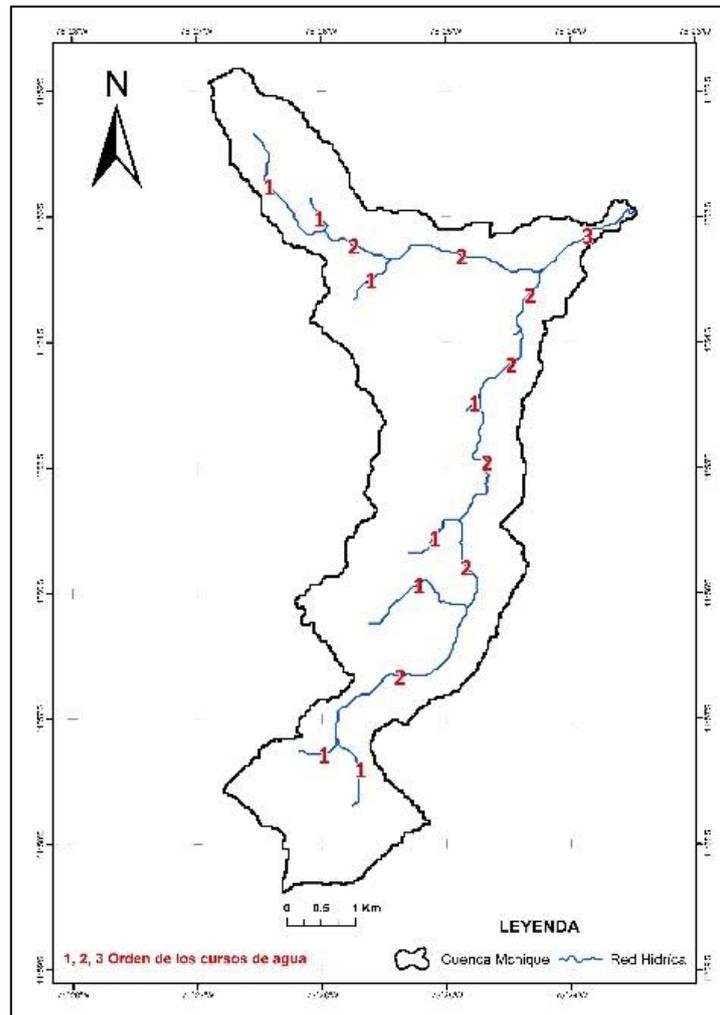


Figura 69: Orden de los ríos en la cuenca Mchique

b. Relación de bifurcación (R_b)

La relación de bifurcación obtenida utilizando la ecuación 25, tal como se muestra en la Tabla 62.

Tabla 62: Relación de bifurcación en la cuenca Ayna

Orden	Cantidad	Relación	R_b
1	14	—	-
2	8	$1^\circ/2^\circ$	0.57
3	5	$2^\circ/3^\circ$	0.63
Total	27	—	-

La relación de bifurcación de la cuenca Mchique es como se muestra en la Tabla 63:

Tabla 63: Relación de bifurcación en la cuenca Mchique

Orden	Cantidad	Relación	Rb
1	9		–
2	9	1°/2°	1
3	1	2°/3°	9
Total	19		

c. Densidad de drenaje (D_d)

La densidad de drenaje para la cuenca Anya se obtiene luego de determinar la longitud total de los ríos y/o corrientes de distintos órdenes. El desagregado de las longitudes para la cuenca Anya se muestra en la Tabla 64:

Tabla 64: Cantidad de corrientes según orden en la cuenca Anya

Orden	Cantidad	%	Longitud (km)
1	14	51.9	25.17
2	8	29.6	7.36
3	5	18.5	8.59
Total	27	100	41.12

Por lo tanto, la densidad de drenaje de la cuenca Anya es $D_d = 41.12 / 48.03 = 0.856$ que es menor a la unidad y que según la Tabla 16, corresponde a una densidad de drenaje Baja.

La densidad de drenaje para la cuenca Mchique fue obtenida después de determinar la longitud total de los ríos y/o corrientes de distintos órdenes. El desagregado de las longitudes para la cuenca es la que se muestra en la Tabla 65:

Tabla 65: Cantidad de corrientes según su orden en la cuenca Mchique

Orden	Cantidad	%	Longitud (Km)
1	9	47.4	8.16
2	9	47.4	15.79
3	1	5.2	1.61
Total	19	100	25.56

Siendo la longitud total de los cauces dentro de la cuenca Mchique igual a 25.56 Km y área de la cuenca igual a 28.55 Km², se obtiene que la densidad de drenaje es $D_d = 25.56 / 28.55 = 0.90 \text{ Km/Km}^2$ lo que significa que es una densidad de drenaje Moderada. La densidad de drenaje (D_d) de las cuencas Anya y Mchique es 0.86 km/km² y 0.90 km/km² correspondiéndoles una baja y moderada D_d respectivamente, debido a la corta longitud de sus cauces y poca extensión de sus cuencas de drenaje, ya que son cuencas de cabecera aportantes a la cuenca del río Mantaro. En cuencas de mayor tamaño, la baja densidad de drenaje conduce a inferir una textura de drenaje gruesa, mientras que la alta densidad de drenaje conduce a una textura de drenaje fina, un alto escurrimiento y un potencial de erosión del área de la cuenca (Kabite & Gessesse, 2018).

d. Extensión media del escurrimiento superficial (E_s)

Siendo el área de la cuenca Anya igual a 48.03 km² y la longitud total de los cursos de agua igual a 41.12 km., la extensión media del escurrimiento superficial en la cuenca Anya resultante es $E_s = 48.03 / (4 \times 41.12) = 0.292 \text{ km}$. Siendo el área de la cuenca Mchique igual a 28.55 Km² y la longitud total de los cursos de agua igual a 25.56 Km (Tabla 60), la extensión media del escurrimiento superficial en la cuenca Mchique resultante es $E_s = 28.55 / (4 \times 25.56) = 0.279 \text{ km}$.

e. Índice de torrencialidad y/o coeficiente de torrencialidad (C_t)

El índice de torrencialidad de la cuenca Anya se obtuvo contabilizando la cantidad de corrientes de orden 1 entre el área de la cuenca, en este caso, 14 ríos de orden 1 y área de cuenca: 48.03 Km², por tanto, el índice de torrencialidad resultante es $C_t = 14/48.03 = 0.29$. En la cuenca Mchique, según la Tabla 60 el número de cauces de orden 1 es 9 y siendo el área de la cuenca igual a 28.55 Km², el coeficiente de torrencialidad es $C_t = 9 / 28.55 = 0.315$.

4.2.4. Parámetros de declividad de las cuencas

a. Pendiente media (S)

Para la cuenca Anya, se realizó el cálculo de la pendiente media utilizando el criterio de Alvord. Se obtuvo la Tabla 66:

Tabla 66: Variables de cálculo de la pendiente media en la cuenca Anya por Alvord

Desnivel entre curvas (km)	Longitud curva= l_i (km)	Área= a_i (km ²)	$W^i=a_i/l_i$
0.08	1.67	6.070	3.630
0.08	1.86	0.460	0.248
0.08	10.58	3.604	0.341
0.08	14.93	4.870	0.326
0.08	8.34	6.366	0.763
0.08	0.22	0.006	0.029
0.08	5.79	1.372	0.237
0.08	4.38	1.183	0.270
0.08	3.61	1.179	0.327
0.08	1.14	0.483	0.425
0.08	1.51	0.130	0.086
0.08	7.56	2.261	0.299
0.08	0.63	0.056	0.090
0.08	1.36	0.419	0.308
0.08	0.82	0.047	0.057
0.08	2.59	0.877	0.338
0.08	1.91	0.544	0.285
0.08	0.73	0.280	0.384
0.08	0.66	0.042	0.064
0.08	0.30	0.006	0.020
0.08	0.41	0.027	0.066
0.08	0.32	0.014	0.043
0.08	2.12	2.194	1.032
0.08	9.60	2.394	0.249
0.08	10.40	5.162	0.496
0.08	10.22	2.546	0.249
0.08	10.40	2.466	0.237
0.08	11.29	2.968	0.263
0.08	0.12	0.001	0.008
Sumatoria	125.47	48.03	

Siendo la equidistancia entre las curvas de nivel en la cuenca Anya de 800 m (0.8 km) y la suma de sus longitudes 125.47 km, la pendiente media resultante según el criterio de Alvord es: $S = (0.08 \times 125.47) / 48.03 = 20.89\%$ la cual es propia de un relieve fuertemente accidentado.

Para la cuenca Mchique según el criterio de Alvord, se obtuvieron los siguientes valores (Tabla 67):

Tabla 67: Variables de cálculo de la pendiente media en la cuenca Mchique por Alvord

Desnivel entre curvas (km)	Longitud curva, l_i (km)	Área, a_i (km ²)	$W_i=a_i/l_i$
0.08	0.171	0.019	0.113
0.08	0.699	0.337	0.482
0.08	0.517	0.198	0.382
0.08	2.622	1.311	0.500
0.08	3.414	2.883	0.844
0.08	0.712	0.078	0.109
0.08	0.398	0.022	0.056
0.08	2.970	1.862	0.627
0.08	0.807	0.073	0.091
0.08	0.227	0.010	0.042
0.08	4.371	2.092	0.479
0.08	0.612	0.033	0.054
0.08	0.884	0.302	0.341
0.08	0.911	1.900	2.086
0.08	2.110	0.253	0.120
0.08	0.735	0.063	0.086
0.08	2.514	0.312	0.124
0.08	2.978	0.972	0.327
0.08	1.866	0.654	0.350
0.08	8.465	3.409	0.403
0.08	6.356	2.748	0.432
0.08	2.271	0.617	0.272
0.08	1.447	0.470	0.325
0.08	2.285	4.483	1.962
0.08	1.425	0.886	0.622
0.08	2.904	1.506	0.519
0.08	1.613	0.898	0.557
0.08	0.216	0.155	0.720
Suma	56.50	28.55	

Siendo la equidistancia utilizada entre las curvas de nivel en la cuenca Mchique 800 m (0.8 km) y la suma de las longitudes igual a 56.50 km, la pendiente media resultante según el criterio de Alvord es: $S = (0.08 \times 56.50) / 28.55 = 15.8\%$ que significa que la cuenca es fuertemente accidentada.

b. Perfil longitudinal y cálculo de la pendiente media del cauce principal

Para el trazo del perfil longitudinal del río Anya se obtuvo del Arc Gis los datos de cota o altura sobre el nivel de mar cada 500 metros. A continuación, se presenta la Tabla 68:

Tabla 68: Progresiva, cota, desnivel y pendiente por tramos del río Anya

Progresiva	Cota (msnm)	Desnivel (m)	S (m/m)	1/(S)^0.5
0+000	3256.00			
0+500	3258.29	2.29	0.0046	14.7641
1+000	3266.34	8.05	0.0161	7.8818
1+500	3273.38	7.03	0.0141	8.4314
2+000	3282.52	9.14	0.0183	7.3948
2+500	3284.83	2.31	0.0046	14.7173
3+000	3288.42	3.60	0.0072	11.7899
3+500	3296.00	7.58	0.0152	8.1244
4+000	3298.02	2.02	0.0040	15.7344
4+500	3307.91	9.89	0.0198	7.1104
5+000	3316.19	8.28	0.0166	7.7703
5+500	3323.88	7.69	0.0154	8.0655
6+000	3332.16	8.28	0.0166	7.7701
6+500	3345.16	13.00	0.0260	6.2017
7+000	3356.57	11.41	0.0228	6.6184
7+500	3383.85	27.27	0.0545	4.2818
8+000	3399.43	15.58	0.0312	5.6642
8+500	3413.59	14.16	0.0283	5.9428
9+000	3438.49	24.91	0.0498	4.4805
9+500	3460.16	21.66	0.0433	4.8041
10+000	3482.42	22.26	0.0445	4.7397
10+500	3497.95	15.53	0.0311	5.6738
11+000	3511.49	13.54	0.0271	6.0764

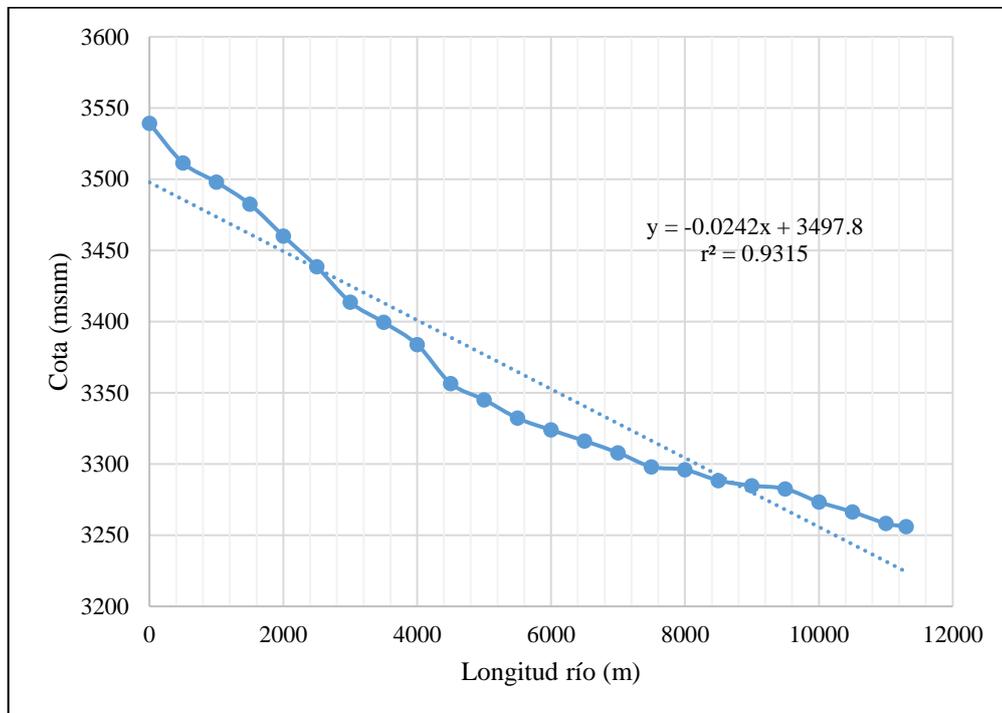


Figura 70: Perfil longitudinal del río Anya

De la visualización del perfil longitudinal (Figura 70) podemos determinar que las pendientes más pronunciadas se encuentran en los tramos de las nacientes del río donde la altitud es superior a los 3500 msnm. Asimismo, es notorio que existen fuertes cambios en su gradiente topográfica. Siendo la altura máxima ($H_{\text{máx}}$) igual a 3529.23 msnm, la altura mínima ($H_{\text{mín}}$) igual a 3256.00 msnm y longitud del río = 11305.23 m, la pendiente media resultante del río Anya es $S = (3539.23-3256.00) / 11305.23 = 2.51\%$. Para el trazo del perfil longitudinal del río Mchique, se adjunta la Tabla 69 con los datos obtenidos desde el ArcGis para el río Mchique (progresivas cada 500 metros).

Tabla 69: Progresiva, cota, desnivel y pendiente por tramos del río Mchique

Progresiva	Cota (msnm)	Desnivel (m)	S (m/m)	$1/(S)^{0.5}$
0+000	3335.48			
0+500	3373.97	38.49	0.0770	3.6040
1+000	3398.95	24.98	0.0500	4.4740
1+500	3467.67	68.72	0.1374	2.6974
2+000	3546.37	78.70	0.1574	2.5205
2+500	3581.33	34.95	0.0699	3.7822
3+000	3615.35	34.03	0.0681	3.8334
3+500	3693.03	77.68	0.1554	2.5371
4+000	3705.03	12.00	0.0240	6.4537
4+500	3711.91	6.88	0.0138	8.5272
5+000	3716.04	4.13	0.0083	11.0072
5+500	3726.29	10.26	0.0205	6.9817
6+000	3781.48	55.19	0.1104	3.0099
6+500	3803.18	21.69	0.0434	4.8007
7+000	3815.38	12.20	0.0244	6.4014
7+500	3827.43	12.05	0.0241	6.4405
8+000	3847.67	20.24	0.0405	4.9704
8+500	3882.03	34.35	0.0687	3.8151
9+000	3927.78	45.76	0.0915	3.3056
9+500	3970.20	42.42	0.0848	3.4334
10+000	4000.17	29.97	0.0599	4.0846
10+500	4026.56	26.39	0.0528	4.3530
11+000	4040.45	13.90	0.0278	5.9985
11+500	4049.15	8.70	0.0174	7.5825
12+000	4064.04	14.89	0.0298	5.7940

El perfil del río Mchique es bastante singular (Figura 71), representa un río que nace en macizos rocosos a más de 4000 msnm, que se desplaza formando un cauce de río torrencioso y de fuerte pendiente hacia su desembocadura. Este perfil da cuenta que los procesos de geodinámica del río aún no han sido estabilizados y que la erosión continúa activa.

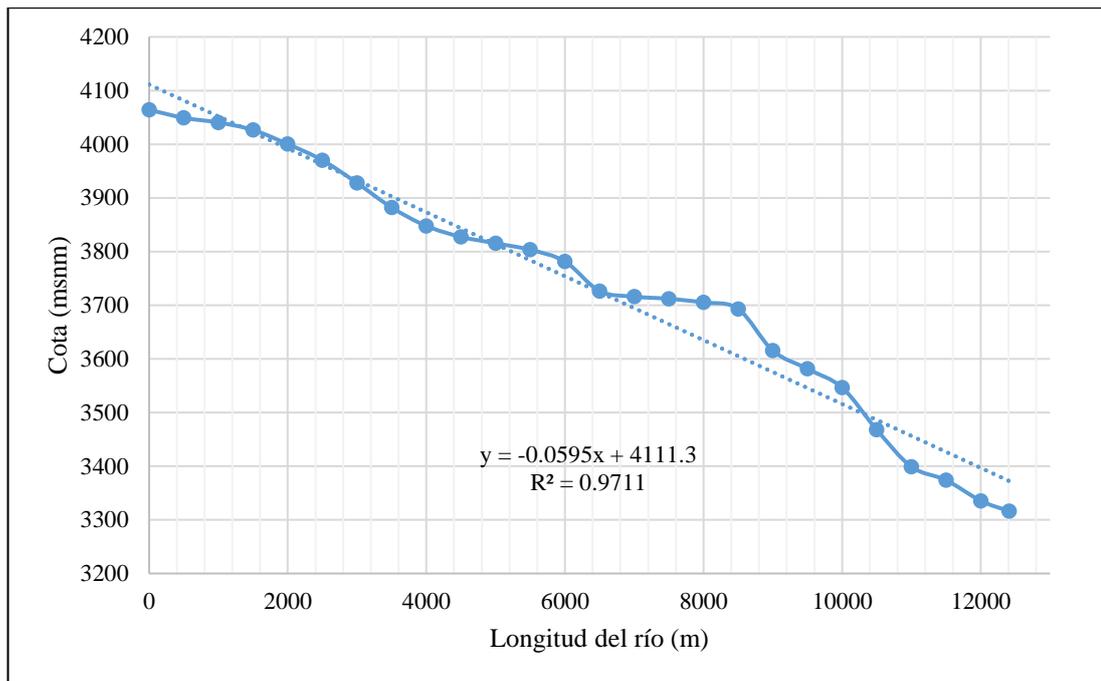


Figura 71: Perfil longitudinal del río Mchique

Su altura máxima ($H_{\text{máx}}$) es igual a 4064.00 msnm, altura mínima ($H_{\text{mín}}$) igual a 3335.48 msnm y longitud del río principal igual a 12 km, lo que da como resultado que la pendiente media del río Mchique sea $S = (4064.00 - 3335.48) / 12000.00 = 6.07\%$.

Los perfiles longitudinales de los ríos Anya y Mchique (Figura 70 y 71) muestran una pendiente promedio de 3% y 6%, sus longitudes de corriente principal son iguales a 11.3 km y 12 km, notándose que el río Anya tiene un lecho conformado por 03 zonas: una zona alta (de mayores pendientes en el sector cordillerano), media y baja (coincidente con el valle). El río Mchique se desarrolla a partir de un macizo rocoso, con una zona vadosa (bofedal) en la mitad de su recorrido y cuya pendiente muestra cambios abruptos debido al control litológico y estructural, inclusive muy cerca de su confluencia con el río Mantaro. Con respecto al lecho de los ríos Anya y Mchique muestran algunas diferencias: el río Anya tiene un lecho poco rocoso y parcialmente vegetado, siendo sinuoso en la parte baja; el río Mchique no es sinuoso y posee un lecho rocoso en toda su trayectoria (Grados 2012).

Respecto a los ríos Anya y Mchique, su morfología y comportamiento es propio de corrientes de alta montaña, tal y cual lo describe Pérez (2015) “En este tipo de torrentes

y/o ríos se distinguen tres tramos morfológicamente bien diferenciados: un curso de cabecera, que posee un perfil transversal en U y el lecho incrustándose en el terreno, en descenso sistemático. Este descenso del lecho afecta a la estabilidad de las laderas de las márgenes que llegan a alcanzar alturas inestables que pueden causar roturas y desplazamientos en masa, que incorporan sólidos a la corriente de manera brusca y masiva, y que podrían poner en peligro la seguridad de bienes y personas. Un curso medio por donde marchan hacia el llano las aguas acumuladas por los cauces de cabecera, cuyo nombre popular es el de garganta, pues normalmente el paso de las aguas entre las laderas escarpadas en forma de V adopta ese aspecto estrecho y largo, aunque a veces queda reducido a un tramo muy corto. Y finalmente, un tercer tramo o curso bajo del río, que se caracteriza por un ensanchamiento del cauce con aguas divagantes sobre los propios materiales sólidos que aportan las aguas del torrente que, en esta zona del curso, tienen tendencia a depositarse”.

c. Índice de pendiente (I_p)

El índice de pendiente se calculó con la ecuación 34 donde a_i y a_{i-1} es la distancia entre las curvas de nivel (m), B_i es la fracción de áreas parciales entre área total de la cuenca y L es la longitud mayor del rectángulo equivalente de las cuencas. Las soluciones parciales de la fórmula se pueden ver en la Tabla 70:

Tabla 70: Valores parciales de cálculo del índice de pendiente - Cuenca Anya

A_i	$B_i = A_i/At$	$a_i - a_{i-1}$	$B_i * (a_i/At)$	$L(km)$	$4 / 5$	$6^{0.5}$
1	2	3	4	5	6	7
11.01	0.22923	124	28.42	11.68	0.002	0.04932
5.49	0.11430	120	13.72	11.68	0.001	0.03426
8.52	0.17739	120	21.29	11.68	0.002	0.04268
8.38	0.17447	120	20.94	11.68	0.002	0.04233
4.33	0.09015	120	10.82	11.68	0.001	0.03043
3.61	0.07516	120	9.02	11.68	0.001	0.02778
3.02	0.06288	120	7.55	11.68	0.001	0.02541
1.87	0.03893	120	4.67	11.68	0.00040	0.02000
1.62	0.03373	80	2.70	11.68	0.00023	0.01520
0.18	0.00375	20	0.07	11.68	0.00001	0.00253
48.03					Sumatoria=	1.02%

La Tabla 71 muestra las soluciones parciales para el cálculo del índice de pendiente en la cuenca Mchique.

Tabla 71: Valores parciales de cálculo del índice de pendiente – Cuenca Mchique

A_i	$B_i = A_i/A_t$	$a_i - a_{i-1}$	$B_i^* (a_i/A_t)$	L(km)	4 / 5	$6^{0.5}$
1	2	3	4	5	6	7
0.89	0.03117	10	0.31	18.08	0.00002	0.00415
0.76	0.02662	120	3.19	18.08	0.00018	0.01329
0.98	0.03433	120	4.12	18.08	0.00023	0.01509
1.91	0.06690	120	8.03	18.08	0.00044	0.02107
5.84	0.20455	120	24.55	18.08	0.001	0.03684
8.59	0.30088	120	36.11	18.08	0.002	0.04468
6.43	0.22522	120	27.03	18.08	0.001	0.03866
2.59	0.09072	120	10.89	18.08	0.00060	0.02454
0.56	0.01961	120	2.35	18.08	0.00013	0.01141
0.00	0.00000		0.00	18.08	0.00000	0.00000
28.55					Suma =	0.64%

A continuación, se presenta la Tabla 72 con el resumen de los parámetros geomorfológicos de las cuencas Anya y Mchique respectivamente:

Tabla 72: Resumen de parámetros geomorfológicos de las cuencas Anya y Mchique

Item	Parámetros	Unidad	Cuenca Anya	Cuenca Mchique
1	Área (hasta su desembocadura en el río Mantaro)	km ²	48.03	28.55
2	Perímetro	km	31.59	39.33
3	Longitud del curso principal	km	11.30	12.00
4	Frecuencia o Densidad de ríos	Rio/km ²	0.81	0.91
5	Densidad de drenaje	Km/km ²	0.86	0.90
6	Extensión media o escurrimiento superficial	km ² /km	0.29	0.28
7	Índice de compacidad/Gravelius	Adimensional	1.28	2.06
8	Coefficiente de torrencialidad	Adimensional	0.29	0.32
9	Factor de forma	Adimensional	0.38	0.20
10	Pendiente de la cuenca (Alvord)	%	20.9	15.8
11	Relación de elongación	Adimensional	0.87	0.54
12	Relación de circularidad	Adimensional	0.60	0.23
13	Lados del rectángulo equivalente	km	11.68 y 4.11	18.08 y 1.58
14	Tiempo de concentración	horas	3.20	2.21
15	Pendiente media del río principal	%	2.51	6.07
16	Altura mediana de la cuenca	msnm	3600.00	3800.00
17	Altura media ponderada	msnm	3700.00	3831.42
18	Altura media de la cuenca	msnm	3788.00	3735.00

En cuanto a las características geomorfológicas de las cuencas estudiadas, se constatan que éstas pertenecen a paisajes montañosos típicos de la cordillera de los

Andes con fuertes desniveles, en donde sus capacidades erosivas se ven acentuadas por sus pendientes, más que por sus índices de compacidad y elongación. Los índices hidrológicos demuestran que el coeficiente de escorrentía es mayor en la cuenca Anya, lo cual influye en su poca capacidad de almacenar agua, en tanto la cuenca Mchique con un coeficiente de escorrentía menor muestra mayor capacidad de almacenamiento. Estos valores se explican por las características texturales de los suelos, más por la cobertura vegetal que puede ser modificada por acción antrópica que por la torrencialidad de las cuencas (Del Aguila & Mejía 2021).

4.2.5. Tiempos de concentración de las cuencas de estudio

Se realizó la estimación del tiempo de concentración para las cuencas de estudio, utilizándose las ecuaciones empíricas de Giandiotti, Kirpich, California (USBR), Bransby Williams, Passini y Témez, las cuales usan diferentes parámetros de las cuencas, tal como se observa en la Tabla 73.

Tabla 73: Resultados del cálculo del tiempo de concentración para ambas cuencas

Parámetros de la cuenca	Und.	Cuenca Anya	Cuenca Mchique
Área de la cuenca	Km ²	48.03	28.55
Cota máxima - curso principal	msnm	3529.23	4064.04
Cota mínima - curso principal	msnm	3256.00	3335.48
Desnivel del curso principal (H)	Km	0.273	0.729
Longitud del curso principal (L)	Km	11.30	12.00
Pendiente del curso principal (S)	m/m	0.025	0.061
Pendiente del curso principal (Según Taylor)	m/m	0.016	0.040
Rugosidad (n)		0.038	0.050
Tiempos de concentración según:			
GIANDIOTTI	Hr	3.49	1.82
KIRPICH	Hr	1.84	1.32
CALIFORNIA (U.S.B.R.)	Hr	1.84	1.32
BRANSBY - WILLIAMS	Hr	3.98	3.66
PASSINI	Hr	5.67	3.07
PEREZ	Hr	1.52	0.90
TEMEZ	Hr	3.89	3.38
Promedio	Hr	3.20	2.21
Desviación Estándar		0.95	0.29
Varianza		0.91	0.09
TIEMPO DE CONCENTRACION FINAL	Hr	3.20	2.21

Las pequeñas áreas de estas cuencas, suponen tiempos de concentración cortos, en los cuales, frente a una tormenta, toda el área contribuye a la escorrentía superficial. Los resultados de los tiempos de concentración (T_c) de las cuencas Anya y Mchique son 3.20 horas y 2.21 horas respectivamente. Se puede notar que el valor mayor del tiempo de concentración del río Anya se debe a la menor pendiente 3% frente a 6% del río Mchique.

4.2.6. Caracterización hidrológica de las cuencas de estudio

La caracterización hidrológica de las cuencas de estudio se realizó en base a índices estadísticos reportados en la literatura científica (Ochoa *et al.*, 2016) que se describió a detalle en el marco teórico. La Tabla 74 contiene las características estadísticas y/o índices hidrometeorológicos de las cuencas Anya y Mchique, las cuales dan información del comportamiento de las variables precipitación y caudal. En el caso de la precipitación se comprueba que el índice de estacionalidad (SINDX) es igual a 0.5 (donde el cero “0” significa NO estacional) por lo tanto, en ambas cuencas la precipitación es estacional, con período de lluvias comprendida entre setiembre y marzo, siendo el porcentaje de días con precipitación igual a cero es mayor en Mchique (DAYP0= 43.56%) equivalente a 159 días y en Anya el DAYP0=35.34% (129 días). El comportamiento de la precipitación diaria es variable en ambas cuencas donde el coeficiente de variación es $PVAR > 1.70$, sin embargo, no ocurre lo mismo con los caudales de los ríos en ambas cuencas que muestran un comportamiento muy estable ($QVAR < 0.50$). Nótese que el índice y/o tasa que relaciona el volumen de precipitación entre el volumen de caudal anual (RR) obtenido con datos diarios es, a fines prácticos, el coeficiente de escorrentía, observándose que el coeficiente de escorrentía es mucho mayor en la cuenca Anya que en la cuenca Mchique (0.52 y 0.44) relativos al año base (2014).

Tabla 74: Índices hidrometeorológicos de las cuencas de estudio

Índices	C. Anya	C. Mchique	Longitud de registro
Índices relativos a características de precipitación			
SINDX	0.5	0.5	
DESVEST	3.76	3.78	
MEDIA	2.19	2.09	
PVAR	1.72	1.81	Año 2014
N	365	365	
N0	129	159	
DAYP0	35.34%	43.56%	
Índices relativos a características de caudales			
RR	0.52		
0.44			
DESVESTA	0.198	0.056	Año 2014
MEDIA	0.54	0.25	
QVAR	0.317	0.227	
Q90	0.234	0.189	
Q50	0.457	0.249	
Q90/Q50	51%	76%	01/12/2013-31/03/2015
DAYQ0	0%	0%	
Q75	0.303	0.220	
Q66	0.331	0.230	
Q33	0.669	0.275	
R2FDC	-0.925	-0.232	
IRH	0.248	0.453	

Para poder caracterizar el caudal base y/o flujo base, se utilizó el método del análisis de frecuencia a través de la gráfica de las curvas de duración (FCD) de los ríos Anya y Mchique utilizándose los datos hidrométricos observados correspondientes al período de estudio: diciembre de 2013 a marzo de 2015, tal como se aprecia en las Figuras 72 y 73. De la visualización y análisis de la curva de duración (FCD) de los ríos Anya y Mchique se observa que le corresponde a la cuenca Anya una pendiente del tercio medio de la FDC en escala logarítmica ($R2FDC=-0.925$) muy pronunciada, físicamente representa a un río con respuesta de flujos de alta escorrentía superficial después de una lluvia torrencial, por el contrario, la FCD del río Mchique posee una pendiente leve ($R2FDC=-0.232$) correspondiéndole una mayor capacidad de almacenamiento. La parte de la curva que fluye debajo del Q_{50} representando las condiciones de bajo caudal tiene una pendiente baja en el caso de Mchique que significa que el caudal base es importante. Asimismo, la relación entre el Q_{90}/Q_{50} se puede utilizar para indicar el porcentaje de caudal que procede del almacenaje

subterráneo y según los resultados obtenidos, en la cuenca Anya es de un 51% frente a un 76% en la cuenca Mchique.

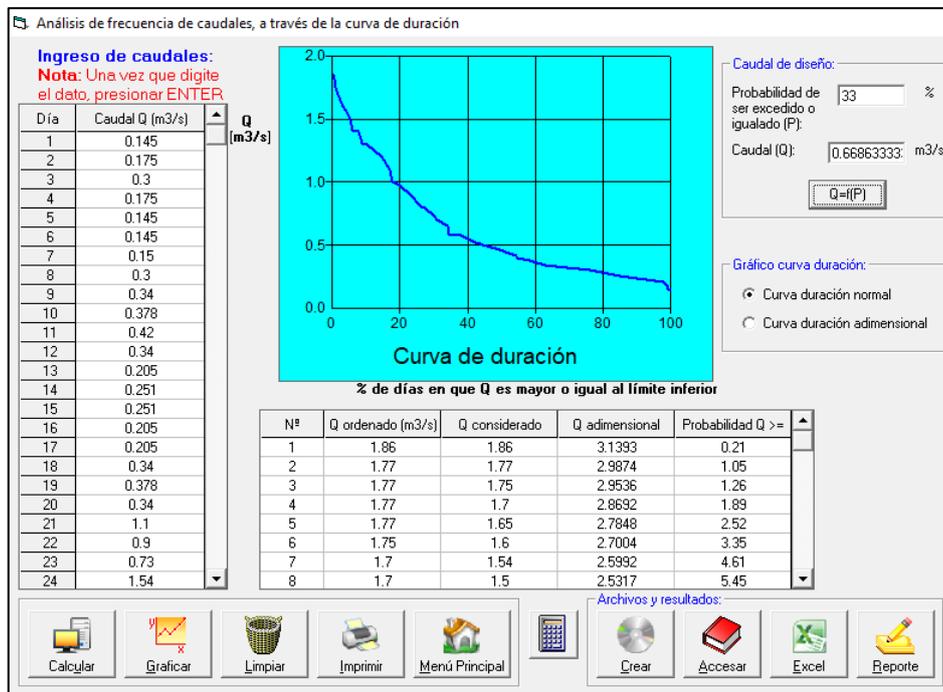


Figura 72: Curva de duración de la cuenca Anya (Salida HidroEsta)

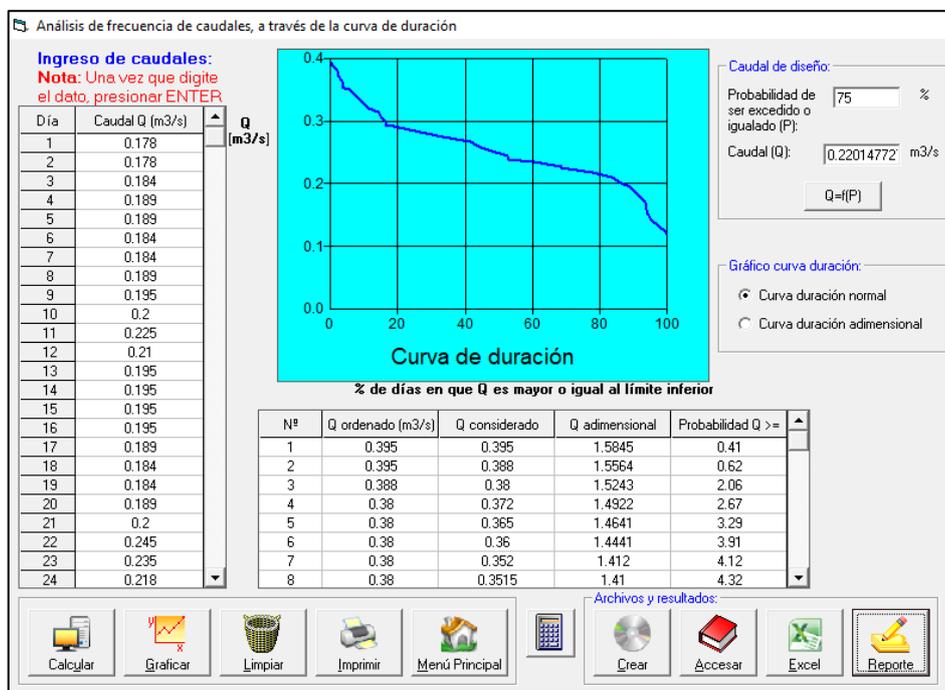


Figura 73: Curva de duración de la cuenca Mchique (Salida HidroEsta)

Lo que ocurre con los hidrogramas y el flujo base en las cuencas Anya y Mchique, es lo que sucede en las cuencas tropicales, donde, debido a las propiedades del suelo y a las tasas altas de precipitación, el flujo rápido domina los hidrogramas. En cuencas con una gran extensión de pastos (como ocurre en Mchique), el flujo base domina la generación del flujo a pesar de las marcadas pendientes y altas tasas de precipitación (Plesca *et al.*, 2012).

4.3. APLICACIÓN DE MODELOS PRECIPITACIÓN- ESCORRENTÍA

4.3.1. Modelamiento hidrológico con Lutz Scholtz (LS)

En principio, se descargaron los datos de precipitación mensual del SENAMHI del año 2014 pertenecientes a las estaciones cercanas al área de estudio: Acopalca, Ingenio, Jauja y Huayao, a las que se analizaron en su consistencia para que sean usadas como estaciones índices en el caso de que fuera necesario corregir información de las cuencas Anya y Mchique. La Tabla 75 muestra la precipitación mensual registrada y la Figura 74 muestra el pluviograma mensual de las estaciones del SENAMHI. Cabe resaltar que se realizó la corrección de la información de precipitación para el caso de los meses de febrero y marzo de la estación Ingenio y para el mes de mayo de la estación Huayao a través del método de la recta de regresión.

Tabla 75: Precipitación mensual (mm) estaciones del SENAMHI – año 2014

Estación	AÑO 2014												Total
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Acopalca	184.7	111.7	175	45.1	31.3	1.2	6.3	10.9	71.6	51.5	73.5	142.7	905.50
Ingenio	155.7	127.0*	131.5*	67.4	17.8	3.8	5.8	4.4	61.4	43.1	74.8	106.7	799.37
Jauja	110.2	108.3	150.5	53.2	24.7	4.8	12.7	0.9	41.1	28.6	76.8	122.7	734.50
Huayao	139.8	87.54	139.8	42.2	28.7*	8.5	15.6	1.4	60.8	35.8	66.7	115.7	742.54

*Datos corregidos

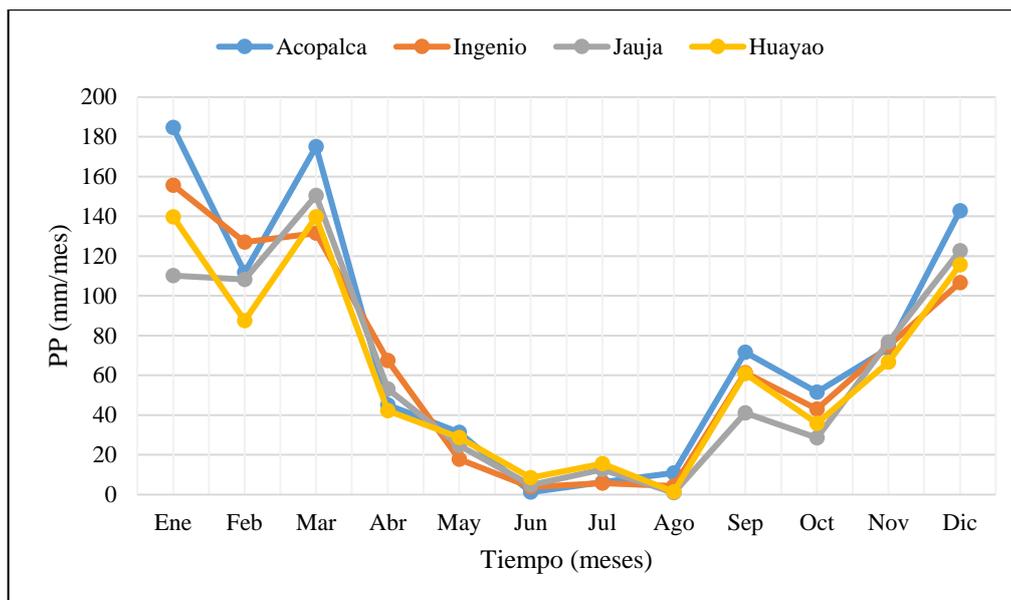


Figura 74: Pluviograma mensual estaciones del SENAMHI – año 2014

Del análisis del pluviograma, se nota que las mayores precipitaciones ocurrieron en los meses de enero y marzo y que las lluvias pertenecientes al año hidrológico 2015 empezaron el mes de setiembre del año 2014. En el mes de octubre de este año, hubo un descenso de las precipitaciones, que fue registrado en todas las estaciones.

Los modelos hidrológicos requieren como datos de entrada, la serie de precipitación mensual promediada de varios años, por lo que, en primer lugar, se realizó el consolidado mensual de precipitación (mm) medidas in situ por el proyecto VLIR, utilizando para ello las estaciones pluviométricas automáticas instaladas en cada cuenca. Las Tablas 76 y 77 contienen el consolidado de la precipitación promedio para ambas cuencas de estudio, en los períodos de datos reportados por el proyecto VLIR (2013 a 2015 en Anya y 2014 a 2016 en Mchique) y los datos generados con PISCO en base a los puntos definidos en la Tabla 36 con una longitud de registro de 36 años (1981 – 2016). Se verificó que los datos promedios mensuales generados tienen una alta correlación con los datos observados de precipitación en los años definidos por cuenca (Figuras 75 y 76) $r = 0.9521$ en Anya y $r = 0.9734$ en Mchique, lo cual significa que los datos generados con PISCO pueden ser utilizados confiadamente en el modelamiento porque tienen una alta correlación con los datos observados en la zona de estudio. Por ejemplo, Asurza y Lavado (2020) utilizaron el producto PISCO en la estimación de parámetros regionales del modelo SWAT en cuencas de drenaje del Océano Pacífico.

Tabla 76: Precipitación promedio anual (mm) - cuenca Anya

Mes	PP promedio		
	VLIR (2013 - 2015)	PISCO (2013 - 2015)	PISCO (1981 - 2016)
Ene	125.7	148.8	122.5
Feb	125.3	136.6	132.8
Mar	124.4	117.5	117.9
Abr	79.0	62.9	54.5
May	30.9	23.0	14.8
Jun	1.7	6.2	5.6
Jul	5.4	4.7	4.0
Ago	1.6	14.6	11.4
Set	63.3	41.1	33.0
Oct	27.6	48.7	63.8
Nov	57.7	69.9	71.0
Dic	97.5	128.6	110.4
Suma	740.1	802.5	741.8

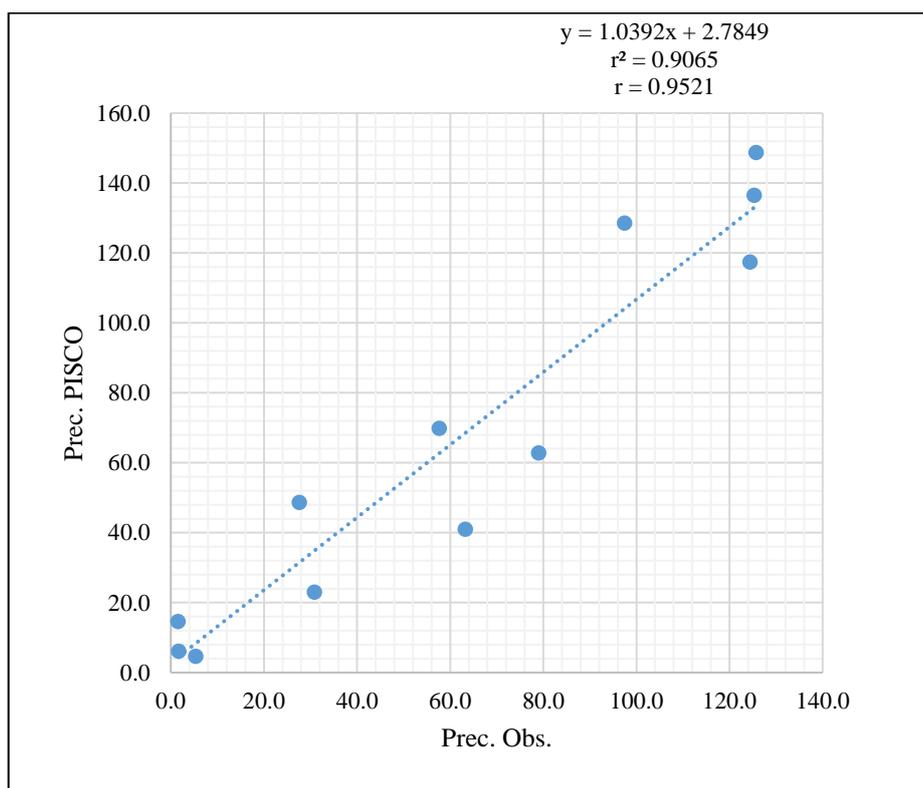


Figura 75: Correlación Prec. Obs. y Prec. PISCO – Anya (2013-2015)

Tabla 77: Precipitación promedio anual (mm) - cuenca Mchique

Mes	PP promedio		
	VLIR (2014 - 2016)	PISCO (2014 - 2016)	PISCO (1981- 2016)
Ene	117.7	114.3	114.6
Feb	130.6	136.4	128.8
Mar	86.4	112.1	111.7
Abr	54.8	64.3	53.6
May	14.4	18.5	13.5
Jun	14.9	4.1	6.2
Jul	8.3	4.1	3.6
Ago	7.3	8.1	12.2
Set	40.8	46.8	35.4
Oct	65.0	57.2	65.4
Nov	82.1	65.9	69.7
Dic	107.4	122.0	114.2
Suma	729.7	753.7	728.9

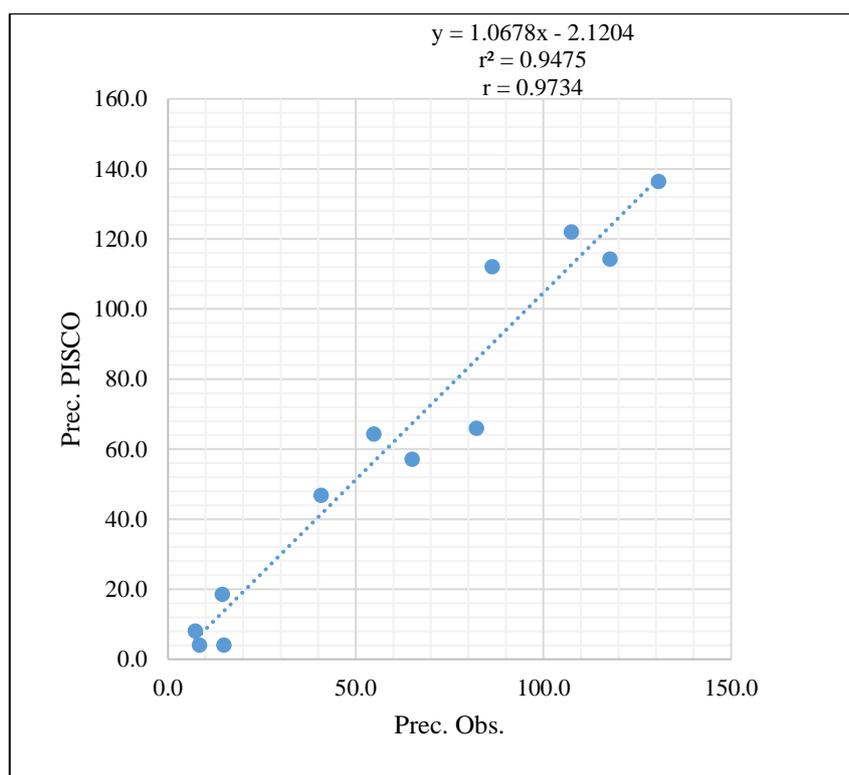


Figura 76: Correlación Prec. Obs. y Prec. PISCO – Mchique (2014-2016)

Para las variables temperatura y evapotranspiración, se utilizaron los datos correspondientes al año 2014. La Tabla 78 contiene el consolidado de datos de temperatura y evapotranspiración de las cuencas Anya y Mchique del año 2014 (medidas *in situ*).

Tabla 78: Consolidado mensual de datos de T (°C) y ETo (mm) – año 2014

Mes	C. Anya		C. Mchique	
	T (°C)	ETo (mm)	T (°C)	ETo (mm)
Ene	11.38	86.48	10.18	90.21
Feb	11.88	75.67	10.16	75.32
Mar	11.46	77.57	9.91	87.18
Abr	11.28	69.63	10.88	86.37
May	10.93	79.95	9.98	92.38
Jun	10.22	85.42	9.81	103.20
Jul	9.77	78.38	8.92	97.58
Ago	9.83	88.10	9.09	113.31
Set	11.48	78.59	10.13	99.31
Oct	11.84	87.00	10.40	102.59
Nov	12.59	95.41	11.18	113.57
Dic	12.46	81.32	10.88	97.03
MAX	12.59	95.41	11.18	113.57
MIN	9.77	69.63	8.92	86.37
PROM.	11.26		10.13	
TOTAL		983.53		1158.05

La Figura 77 muestra la variación espacial de la temperatura promedio dentro de las cuencas de estudio, donde es notorio que, a nivel del valle, las temperaturas son mayores.

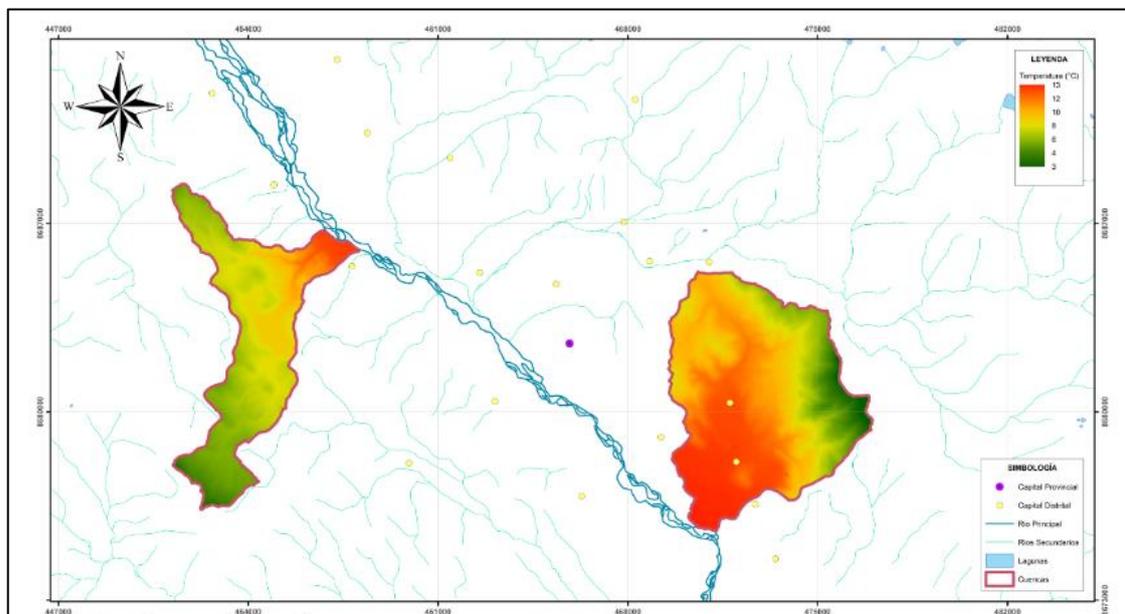


Figura 77: Mapa de temperatura promedio anual (medidas *in situ*) – año 2014

Tabla 79: Estimación de la ET_0 – Fórmula de Hargreaves, cuenca Anya

<i>Cuenca: ANYA</i>												<i>Altura: 3355 msnm</i>				<i>Latitud: 11.93</i>		<i>Longitud: 75.26 W</i>	
Mes	Nro. días	MF (mm/mes)	T (°C)	T(°F)	HR (%)	CH	CE	n	N	%	RSM	ET ₀	ET ₀	ET ₀	ET ₀				
												(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/día)				
												Temp.	Rad.	Prom.	Prom.				
Ene	31	2.623	11.4	52.5	82.1	0.70	1.067	5.00	12.70	39.4	242.2	103.3	95.3	99.3	3.2				
Feb	28	2.291	11.9	53.4	82.6	0.69	1.067	4.40	12.50	35.2	203.1	90.3	81.3	85.8	3.1				
Mar	31	2.003	11.5	52.6	83.2	0.68	1.067	5.10	12.15	42.0	232.0	76.5	91.6	84.0	2.7				
Abr	30	1.801	11.3	52.3	80.6	0.73	1.067	6.60	11.80	55.9	235.6	73.5	92.4	82.9	2.8				
May	31	1.801	10.9	51.7	74.4	0.84	1.067	7.50	11.50	65.2	234.7	83.4	91.0	87.2	2.8				
Jun	30	1.611	10.2	50.4	66.5	0.96	1.067	7.90	11.35	69.6	217.7	83.2	82.3	82.8	2.8				
Jul	31	1.721	9.8	49.6	65.5	0.98	1.067	8.70	11.40	76.3	243.7	88.9	90.6	89.8	2.9				
Ago	31	1.952	9.8	49.7	59.5	1.00	1.067	7.40	11.70	63.2	244.1	103.5	91.0	97.2	3.1				
Set	30	2.170	11.5	52.7	69.1	0.92	1.067	6.30	12.00	52.5	239.7	112.5	94.7	103.6	3.5				
Oct	31	2.477	11.8	53.3	70.5	0.90	1.067	8.20	12.40	66.1	298.7	127.0	119.4	123.2	4.0				
Nov	30	2.518	12.6	54.7	71.8	0.88	1.067	8.10	12.70	63.8	294.7	129.6	120.8	125.2	4.2				
Dic	31	2.641	12.5	54.4	77.3	0.79	1.067	6.00	12.80	46.9	262.7	121.4	107.2	114.3	3.7				
Prom.			11.3		73.6				56.3						3.22				
Suma												1193.1	1157.6	1175.3					

Tabla 80: Estimación de la ET_0 – Fórmula de Hargreaves, cuenca Mchique

<i>Cuenca: MCHIQUE</i>												<i>Altura: 3894 msnm</i>				<i>Latitud: 11.92 S</i>				<i>Longitud: 75.43 W</i>			
Mes	Nro días	MF (mm/mes)	T (°C)	T(°F)	HR (%)	CH	CE	n	N	%	RSM	ET ₀	ET ₀	ET ₀	ET ₀								
												(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/día)								
												Temp.	Rad.	Prom.	Prom.								
Ene	31	2.623	10.2	50.3	82.0	0.7	1.078	5.00	12.70	39.4	242.2	100.2	91.4	95.8	3.1								
Feb	28	2.291	10.2	50.3	81.7	0.7	1.078	4.40	12.50	35.2	203.1	88.3	76.6	82.4	2.9								
Mar	31	2.004	9.9	49.8	81.7	0.7	1.078	5.10	12.15	42.0	232.0	76.5	86.7	81.6	2.6								
Abr	30	1.802	10.9	51.6	77.8	0.8	1.078	6.60	11.80	55.9	235.6	78.3	91.1	84.7	2.8								
May	31	1.802	10.0	50.0	70.6	0.9	1.078	7.50	11.50	65.2	234.7	87.3	87.9	87.6	2.8								
Jun	30	1.611	9.8	49.7	59.5	1.0	1.078	7.90	11.35	69.6	217.7	86.2	81.1	83.7	2.8								
Jul	31	1.722	8.9	48.1	62.1	1.0	1.078	8.70	11.40	76.3	243.7	89.2	87.8	88.5	2.9								
Ago	31	1.952	9.1	48.4	56.8	1.0	1.078	7.40	11.70	63.2	244.1	101.8	88.5	95.1	3.1								
Set	30	2.170	10.1	50.2	66.9	1.0	1.078	6.30	12.00	52.5	239.7	112.3	90.3	101.3	3.4								
Oct	31	2.476	10.4	50.7	68.4	0.9	1.078	8.20	12.40	66.1	298.7	126.2	113.6	119.9	3.9								
Nov	30	2.518	11.2	52.1	67.9	0.9	1.078	8.10	12.70	63.8	294.7	133.0	115.2	124.1	4.1								
Dic	31	2.640	10.9	51.6	75.6	0.8	1.078	6.00	12.80	46.9	262.7	120.3	101.6	110.9	3.6								
Prom.			10.1		70.9						56.3					3.17							
Suma												1199.6	1112.0	1155.8									

Como podemos ver, la fórmula de Hargreaves utiliza los datos de: temperatura, humedad relativa y factor mensual de evapotranspiración potencial que depende de la latitud y los datos de n (número de horas de sol registradas) y N (máxima cantidad de horas de sol) que son iguales en ambas cuencas, porque también dependen de la latitud; además de correcciones por humedad relativa y por altura. Se utilizaron las fórmulas en base a la temperatura y en base a la radiación, con los cuales, los resultados demuestran que la cuenca Anya tiene una ET_0 anual de 1175.3 mm y Mchique 1155.8 mm.

La fórmula de Penman adicionalmente a la fórmula de Hargreaves utiliza la variable velocidad del viento. Los resultados del cálculo de la ET_0 , utilizando la fórmula de Penman Monteith se presentan a continuación (Figura 78 y 79), como salida del programa CROPWAT 8.0. Vale la pena precisar que la ecuación estandarizada de Penman-Monteith a sido adoptada y recomendada para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ASCE-EWRI, 2005).

E_{T0} Penman-Monteith Mensual - C:\ProgramData\CROPWAT\data\climate\Quilcas X.PEM

País Estación

Altitud m. Latitud °S Longitud °W

Mes	Prom Temp °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m ² /día	ET ₀ mm/día
Enero	11.4	82	50	5.0	17.9	3.05
Febrero	11.9	83	45	4.4	16.9	2.92
Marzo	11.5	83	43	5.1	17.3	2.90
Abril	11.3	81	43	6.6	18.0	2.86
Mayo	10.9	74	39	7.5	17.5	2.61
Junio	10.2	66	42	7.9	16.9	2.42
Julio	9.8	65	45	8.7	18.4	2.58
Agosto	9.8	59	51	7.4	18.3	2.74
Septiembre	11.5	69	48	6.3	18.5	3.00
Octubre	11.8	70	52	8.2	22.5	3.65
Noviembre	12.6	72	53	8.1	22.7	3.79
Diciembre	12.5	77	50	6.0	19.4	3.37
Promedio	11.3	73	47	6.8	18.7	2.99

Figura 78: Salida del programa CROPWAT – cálculo de ET_0 – cuenca Anya

Mes	Prom Temp	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ET ₀
	°C	%	km/día	horas	MJ/m ² /día	mm/día
Enero	10.2	82	91	5.0	17.9	3.00
Febrero	10.2	82	106	4.4	16.9	2.84
Marzo	9.9	82	89	5.1	17.3	2.81
Abril	10.9	78	74	6.6	18.0	2.90
Mayo	9.9	71	115	7.5	17.5	2.69
Junio	9.8	60	128	7.9	16.9	2.68
Julio	8.9	62	141	8.7	18.4	2.77
Agosto	9.1	57	155	7.4	18.3	3.00
Septiembre	10.1	67	135	6.3	18.5	3.08
Octubre	10.4	68	128	8.2	22.5	3.64
Noviembre	11.2	68	136	8.1	22.7	3.79
Diciembre	10.9	76	117	6.0	19.4	3.30
Promedio	10.1	71	118	6.8	18.7	3.04

Figura 79: Salida del programa CROPWAT – cálculo de ET₀ – cuenca Mchique

Convirtiendo los resultados de mm/día a mm/mes y sumando los resultados de todos los meses, se tiene que la ET₀ en Anya es de 1091.8 mm/año y en Mchique es 1110.5 mm/año (Tabla 81). Para ambas cuencas, notamos que los resultados de la ET₀ utilizando la fórmula de Penman Monteith son menores que con la fórmula de Hargreaves.

Tabla 81: Estimación de la ET₀ en las cuencas de estudio– Fórmula de Penman

Mes	Nro. días	C. Anya		C. Mchique	
		ET ₀ (mm/día)	ET ₀ (mm/mes)	ET ₀ (mm/día)	ET ₀ (mm/mes)
Ene	31	3.05	94.6	3.00	93.0
Feb	28	2.92	81.8	2.84	79.5
Mar	31	2.90	89.9	2.81	87.1
Abr	30	2.86	85.8	2.90	87.0
May	31	2.61	80.9	2.69	83.4
Jun	30	2.42	72.6	2.68	80.4
Jul	31	2.58	80.0	2.77	85.9
Ago	31	2.74	84.9	3.00	93.0
Set	30	3.00	90.0	3.08	92.4
Oct	31	3.65	113.2	3.64	112.8
Nov	30	3.79	113.7	3.79	113.7
Dic	31	3.37	104.5	3.30	102.3
Prom.		2.99		3.04	
Suma			1091.8		1110.5

Tabla 82: Consolidado ET_0 (mm/mes) - cuenca Anya

Mes	Hargreaves	Penman Monteith	Medido in situ
Ene	99.3	94.6	86.5
Feb	85.8	81.8	75.7
Mar	84.0	89.9	77.6
Abr	82.9	85.8	69.6
May	87.2	80.9	80.0
Jun	82.8	72.6	85.4
Jul	89.8	80.0	78.4
Ago	97.2	84.9	88.1
Set	103.6	90.0	78.6
Oct	123.2	113.2	87.0
Nov	125.2	113.7	95.4
Dic	114.3	104.5	81.3
Suma	1175.3	1091.8	983.5

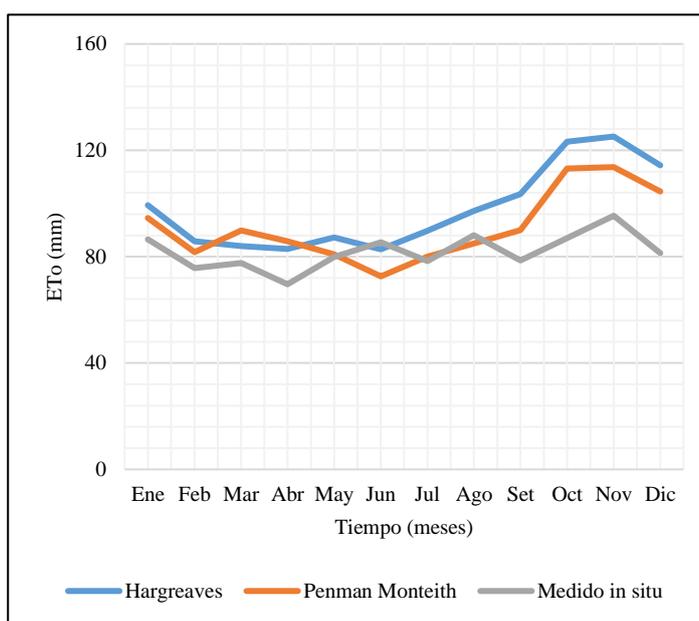


Figura 80: Gráfico de ET_0 mensual – cuenca Anya

Al observar la Tabla 82 y la Figura 80 de lo que ocurre en la cuenca Anya, podemos decir que las fórmulas de Hargreaves y Penman Monteith nos reportan una ET_0 muy parecidas en su comportamiento anual, salvo en el mes de marzo. Es de dudar también, lo que ocurrió con la medición in situ en el mes de setiembre porque el comportamiento habitual es al aumento en relación directa al incremento de la temperatura.

Tabla 83: Consolidado ET_0 (mm/mes) - cuenca Mchique

Mes	Hargreaves	Penman Monteith	Medido in situ
Ene	95.8	93.0	90.2
Feb	82.4	79.5	75.3
Mar	81.6	87.1	87.2
Abr	84.7	87.0	86.4
May	87.6	83.4	92.4
Jun	83.7	80.4	103.2
Jul	88.5	85.9	97.6
Ago	95.1	93.0	113.3
Set	101.3	92.4	99.3
Oct	119.9	112.8	102.6
Nov	124.1	113.7	113.6
Dic	110.9	102.3	97.0
Suma	1155.8	1110.5	1158.1

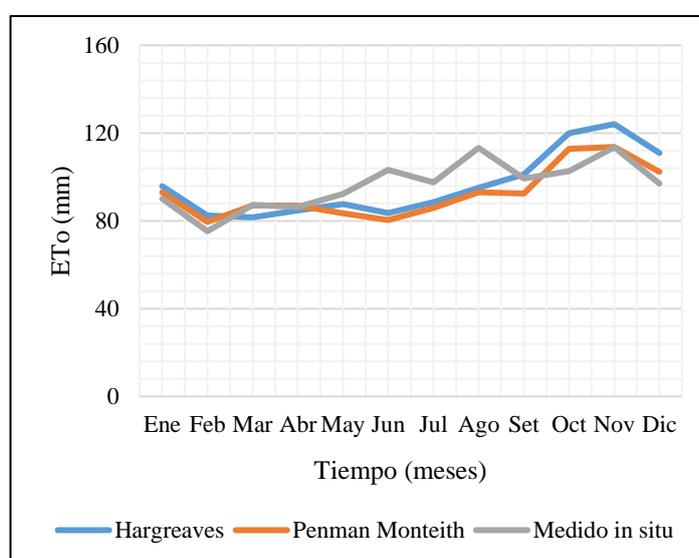


Figura 81: Gráfico de ET_0 mensual – cuenca Mchique

Como se puede visualizar en la Figura 81 en la cuenca Mchique, los resultados de ET_0 por las fórmulas de Hargreaves y Penman Monteith son similares en todos los meses del año estudiado, mostrando el mismo comportamiento (ascensos y descensos), pero existe discrepancia con los datos medidos in situ en el trimestre junio- julio y agosto.

Se ha tenido en consideración los reportes de investigaciones recientes sobre la ET_0 , los cuales concluyen que el modelo que ha demostrado que tiene mayor fiabilidad y precisión en la simulación de la dinámica de evapotranspiración es el Penman-Monteith, que tiene en cuenta tanto los fenómenos aerodinámicos como los factores de resistencia superficial (resistencia del flujo de vapor a través de la vegetación transpirante y la evaporación de la superficie del suelo) (Allen *et al.* 1998; Longobardi & Villani 2013), siendo considerado como uno de los mejores métodos para el cálculo de ET_0 (Remesan & Holman 2015). Este método tuvo numerosas aplicaciones exitosas en los campos de hidrología y agrometeorología y en una variedad de regímenes hidroclimáticos (Tegosa *et al.* 2015). La desventaja básica del modelo Penman-Monteith es el requisito simultáneo de varios datos meteorológicos como la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y las medidas de luz solar, que, para el caso de esta investigación han sido monitoreadas en el período de estudio.

a. Estimación del coeficiente de escorrentía promedio anual (C)

Para la estimación del coeficiente de escorrentía anual de las cuencas Anya y Mchique se utilizó en un primer instante, la fórmula de L. Turc recomendado por Lutz Scholtz (Ec. 77 a 79). Sin embargo, al comprobar que el error es grande (entre el 38 y el 21% del coeficiente de escorrentía observado en la Tabla 84, donde el $C_{Anya}= 0.52$ y $C_{Mchique}= 0.44$) se procedió a utilizar las ecuaciones empíricas (Ec. 80 a 86) encontradas para la región Junín. Con respecto al resultado obtenido con L. Turc, habría que tener presente que varias de las cuencas utilizadas por dicho investigador para establecer sus relaciones, están ubicadas en Francia y Africa. La estimación de este coeficiente, es la parte del cálculo que causa la mayor incertidumbre en el modelo Lutz Scholtz (Plan Meriss, 1980). A continuación, la Tabla 84 contiene las variables de cálculo y el resumen de los coeficientes de escorrentía anual obtenidos.

Tabla 84: Estimación del coeficiente de escorrentía anual de las cuencas de estudio

Variable	C. Anya	C. Mchique	Nro. Ec.	Error (%)		Obs.
				C. Anya	C. Mchique	
Datos básicos						
P (mm/año)	740.1	729.7				
T (°C)	11.3	10.1				
L (Coef. Temperatura Turc)	654.6	605.23				
D (Déficit de esc. Turc)	501.48	475.63				
C (Turc)	0.32	0.35		38.0	20.87	En f(T)
Estimación de Evapotranspiración Potencial (mm/año)						
ETo Penman	1091.80	1110.53				
ETo Hargreaves	1175.30	1155.80				
ETo Medido in situ	983.53	1158.05				
Coefficientes de escorrentía - Fmlas. Empíricas						
C (Con ETo Penman)	0.47	0.45	Ec. 2.77	9.6	-1.95	D en f(ETo Penman)
D (Con ETo Penman)	392.10	402.34	Ec. 2.81			
C (Con ETo Hargreaves)	0.35	0.38	Ec. 2.80	32.0	12.60	
D (Con ETo Hargreaves)	478.28	449.06	Ec. 2.81			
C en f(P y T)	0.41	0.38	Ec. 2.82	20.4	13.02	
C en f(T)	1.84	1.23	Ec. 2.83			Descartado
C en f(P y ETo_ Penman)	0.33	0.31	Ec. 2.86	36.9	28.72	
C en f(ETo_ Penman)	0.30	0.23	Ec. 2.85	43.2	47.46	
C en f(P y ETo_ Hargreaves)	0.27	0.28	Ec. 2.86	48.1	35.95	
C en f(ETo_ Hargreaves)	0.22	0.19	Ec. 2.85	58.3	57.47	
C en f(P y ETo_ Medido in situ)	0.41	0.28	Ec. 2.86	20.9	36.30	
C en f(ETo_ Medido in situ)	1.19	0.19	Ec. 2.85			Descartado
C Observado	0.52	0.44				

La relación empírica que tiene menor error porcentual es la que utiliza la ecuación 81 en función de la evapotranspiración potencial anual obtenida con la fórmula de Penman Monteith, con un $C_{Anya} = 0.47$ y $C_{Mchique} = 0.45$, con los cuales también se procedió a la utilización del modelo Lutz Scholtz.

Asimismo, para mejorar la estimación del coeficiente de escorrentía en ambas cuencas, se creyó por conveniente utilizar la relación de Keler (Ec. 87) y establecerla como ecuación empírica para determinar el coeficiente de escorrentía en las cuencas de la sierra central del Perú- región Junín (válida para precipitaciones superiores a 500 mm) donde el coeficiente de escorrentía (C) es función de la precipitación total anual caída

en la cuenca, las características del relieve y las características de almacenamiento de las cuencas del siguiente modo:

$$C = a - \frac{b}{P}$$

En base a los datos de la zona de estudio, se obtuvieron las siguientes relaciones:

$$C_{Anya} = 1 - \frac{355}{P}$$

$$C_{Anya} = 0.52, \text{ con } P_{2014} = 740.1 \text{ mm/año}$$

Y para la cuenca Mchique:

$$C_{Mchique} = 1 - \frac{405}{P}$$

$$C_{Mchique} = 0.44, \text{ con } P_{2014} = 729.7 \text{ mm/año}$$

Las relaciones empíricas propuestas fueron calibradas con los resultados obtenidos en la caracterización hidrológica de ambas cuencas, con datos medidos in situ en el período 2013 al 2015, específicamente el resultado de la razón entre la Tasa de volumen de descarga promedio y la Precipitación anual (RR, de la ecuación 62) reportado en la Tabla 69 correspondiente a los Índices hidrológicos de importancia a escala de cuenca. Estos resultados, demuestran que en la cuenca Anya, la escorrentía es mayor que en la cuenca Mchique, no obstante, el relieve más accidentado en la cuenca Mchique, lo que nos hace suponer que la composición del suelo en la cuenca Mchique (mayor porcentaje de textura media), es determinante para su mayor capacidad de almacenamiento.

Para poder utilizar las relaciones propuestas, es necesario que se haya hecho un análisis a la curva de duración de caudales (FDC) para determinar el comportamiento del flujo base. La fracción de flujo base respecto al flujo total en el río es un valor que puede ser utilizado como indicador de sostenibilidad de la reserva hídrica en cuencas. Es por esto que la literatura científica ha dedicado gran esfuerzo al conocimiento del flujo base de los ríos (Gómez *et al.* 2016).

b. Datos de entrada al modelo Lutz Scholtz

La Tabla 85 contiene las características generales de las cuencas estudiadas y la Tabla 86 los parámetros del modelo Lutz Scholtz calculados previo al modelamiento. Asimismo, la Figura 82 muestra el mapa de ubicación de los puntos de aforo de las cuencas de estudio hasta donde se determinó las áreas de aporte de la escorrentía, para ser utilizadas en el modelamiento hidrológico.

Tabla 85: Características generales de las cuencas Anya y Mchique - Modelo Lutz Scholtz

Característica	Símb.	Und.	C. Anya	C. Mchique
Área total de la cuenca	A	Km ²	48.03	28.55
Area de aporte de la escorrentía (pto. Aforo)	A _i	Km ²	41.7	25.6
Altitud media de la cuenca	H _m	msnm	3700	3831.42
Pendiente media de la cuenca	P _m	m/m	0.209	0.158
Precipitación media anual corregida	P	mm	740	730
Evapotranspiración anual medida	ET ₀	mm	983.53	1158.05
Evapotranspiración anual Penman M.	ET ₀	mm	1091.80	1110.53
Temperatura media anual medida	T	°C	11.26	10.13

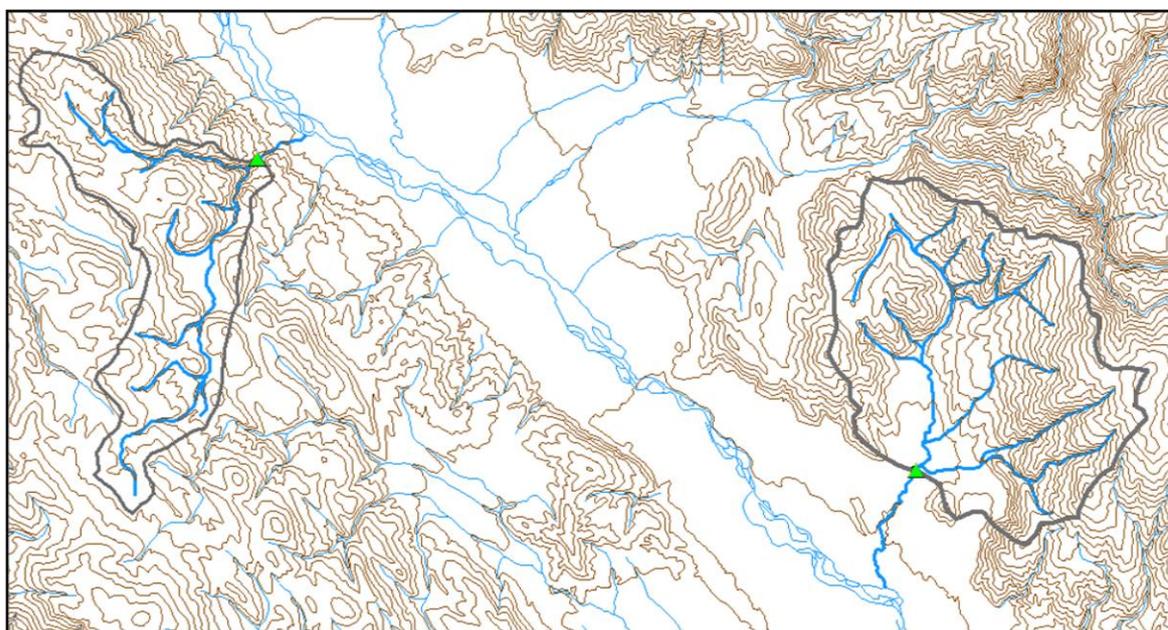


Figura 82: Áreas de escorrentía hasta los puntos de aforo de las cuencas de estudio (E: 1/100 000)

Tabla 86: Parámetros del modelo Lutz Scholtz calculados para las cuencas Anya y Mchique

Característica	Símb.	Und.	C. Anya	C. Mchique
Déficit de escurrimiento ⁽¹⁾	D	mm/año	500.7	492.4
Coefficiente de escorrentía ⁽¹⁾	C	–	0.32	0.39
Déficit de escurrimiento ⁽²⁾	D	mm/año	392.1	402.34
Coefficiente de escorrentía ⁽²⁾	C	–	0.47	0.45
Coefficiente de agotamiento*	a		0.0246	0.0176
*Tipo de agotamiento			Muy rápido	Mediano
Relación de caudales (30 días)	b ₀		0.478	0.591
Area de acuíferos potenciales		km ²	10.4	0.007
Gasto de retención	R	mm/año	50	80

(1) Primera corrida del modelo LS

(2) Segunda corrida del modelo LS

c. Cálculo de la retención de las cuencas

Cuenca Anya

Se realizó el cálculo de la retención de la cuenca Anya considerando área de acuíferos potenciales ($S \leq 12\%$) igual a 10.4 km² más área de lagunas y bofedales igual a 0.01 km². Empleando la Tabla 25, la lámina anual de almacenamiento hídrico por acuíferos potenciales fue:

- Volumen (m³/año) = 10.41 km² x 200 mm/año = 2 082 000 m³/año

Por lagunas y/o bofedales

- Volumen (m³/año) = 0.01 km² x 500 mm/año = 5 000 m³/año

Volumen total de retención en la cuenca es:

- Volumen total (m³/año) = 2 082 000 + 5 000 = 2 087 000 m³/año

Transformando a lámina dividiendo entre el área de la cuenca (41.7 km²) se tiene:

- Lámina (mm/año) = 2 087 000 m³/año / 41.7 km² = 50.05 mm/año

Cuenca Mchique

En el caso de la cuenca Mchique se ha considerado un área de acuíferos potenciales de 7 km² y un área de bofedales de 6 ha (0.06 km²).

Acuíferos potenciales ($S \leq 2\%$)

- Volumen (m³/año) = 7 km² x 300 mm/año = 2 100 000 m³/año

Por bofedales

- Volumen ($\text{m}^3/\text{año}$) = $0.06 \text{ km}^2 \times 500 \text{ mm/año} = 30\,000 \text{ m}^3/\text{año}$
Volumen total de retención en la cuenca es:
- Volumen total ($\text{m}^3/\text{año}$) = $2\,100\,000 + 30\,000 = 2\,130\,000 \text{ m}^3/\text{año}$
Transformando a lámina dividiendo entre el área de la cuenca (25.6 km^2) se tiene:
- Lámina (mm/año) = $2\,220\,000 \text{ m}^3/\text{año} / 25.6 \text{ km}^2 = 83.2 \text{ mm/año} \approx 80 \text{ mm/año}$

d. Estimación de la precipitación efectiva - cuenca Anya ($C_e=0.47$)

La generación de los caudales medios mensuales en el punto de interés en la cuenca Anya (donde se ubica la regla limnimétrica) se realizó con la información generada (PISCO) de precipitación mensual donde el acumulado multianual (1981-2016) fue 741.8 mm, con área de aporte de escorrentía de 41.7 km^2 . En el cálculo de la Precipitación efectiva con los polinomios de 5to. Grado propuestos por el USBR se utilizaron los polinomios de las curvas II y III para 0.30 y 0.45 de coeficiente de escorrentía (Tabla 23) considerándose un coeficiente de escorrentía promedio anual en la cuenca de 0.47 (calculado en base a la fórmula de Penman de la Tabla 84), con lo que se obtuvo una precipitación efectiva acumulada anual de 348.7 mm., determinándose los obteniéndose coeficientes C_1 y C_2 de $C_1=0.24$ y $C_2=0.76$. El coeficiente de agotamiento fue calculado con la fórmula de cuencas con agotamiento rápido, $a = -0.00252(\text{Ln}A) + 0.030$, resultando $a = 0.0206$ días. La Tabla 88 muestra que el mes de abril provee 23.6 mm y en el mes de setiembre el aporte de la retención es de solo 1.1 mm. La estación seca de la cuenca es entre los meses de abril y setiembre lo cual totaliza 183 días.

Para el cálculo del cálculo del abasto (contribución negativa de la retención), en las cuencas Anya y Mchique se han considerado los porcentajes propuestos por Lutz Scholtz en 1980 a través del proyecto Meriss II para la región Junín, los cuales se muestran a continuación (Tabla 87):

Tabla 87: Almacenamiento hídrico durante la época de lluvias en la región Junín

Ene	Feb	Mar	Oct	Nov	Dic	Sum.
30%	30%	5%	0%	5%	30%	100%

FUENTE: Plan Meriss II, 1980.

Tabla 88: Simulación de caudales mensuales río Anya - modelo Lutz Scholtz ($C_e = 0.47$)

Mes	N° días del mes	P mm/mes	Precipitación Efectiva				Contribución de la Retención				Caudales Generados		Caudales Observados	
			PE II mm/mes	PE III mm/mes	PE mm/mes	Gasto (+)		Abasto (-)		mm/mes	m ³ /s	mm/mes	m ³ /s	
						bi	Gi	ai	Ai					
Ene	31	122.5	26.9	87.1	72.4			0.300	15.0	57.4	0.89	60.6	0.94	
Feb	28	132.8	31.5	101.7	84.6			0.300	15.0	69.6	1.20	42.0	0.72	
Mar	31	117.9	24.9	80.6	67.0			0.050	2.5	64.5	1.00	73.3	1.14	
Abr	30	54.5	5.8	15.2	12.9	0.539	23.6			36.5	0.59	42.5	0.68	
May	31	14.8	1.6	3.6	3.1	0.291	12.7			15.8	0.25	26.0	0.40	
Jun	30	5.6	0.6	1.4	1.2	0.157	6.9			8.1	0.13	16.9	0.27	
Jul	31	4.0	0.4	0.9	0.8	0.084	3.7			4.5	0.07	16.0	0.25	
Ago	31	11.4	1.3	2.9	2.5	0.046	2.0			4.5	0.07	13.5	0.21	
Set	30	33.0	3.2	7.3	6.3	0.025	1.1			7.3	0.12	18.6	0.30	
Oct	31	63.8	7.4	20.8	17.5			0.000	0.0	17.5	0.27	18.1	0.28	
Nov	30	71.0	8.9	26.2	22.0			0.050	2.5	19.5	0.31	23.4	0.38	
Dic	31	110.4	21.7	70.3	58.4			0.300	15.0	43.4	0.68	34.3	0.53	
MAX.		132.8								69.6	1.20	73.3	1.14	
MIN.		4.0								4.5	0.07	13.5	0.21	
PROM.											0.47		0.51	
SUMA		741.8	134.2	417.9	348.7	1.141	50.0	1.00	50.0	348.7		385.0		

Utilizando luego, un $C_e = 0.52$, se obtuvo una precipitación efectiva acumulada anual de 385.8 mm, con lo cual no existe diferencia entre el promedio anual de caudales observados y simulados (Tabla 89).

Tabla 89: Simulación de caudales mensuales río Anya - modelo Lutz Scholtz ($C_e = 0.52$)

Mes	N° días del mes	P mm/mes	Precipitación Efectiva				Contribución de la Retención				Caudales Generados		Caudales Observados	
			PE II mm/mes	PE III mm/mes	PE mm/mes	Gasto (+)		Abasto (-)		mm/mes	m ³ /s	mm/mes	m ³ /s	
						bi	Gi	ai	Ai					
Ene	31	122.5	26.9	87.1	80.3			0.300	15.0	65.3	1.02	60.6	0.94	
Feb	28	132.8	31.5	101.7	93.7			0.300	15.0	78.7	1.36	42.0	0.72	
Mar	31	117.9	24.9	80.6	74.3			0.050	2.5	71.8	1.12	73.3	1.14	
Abr	30	54.5	5.8	15.2	14.1	0.539	23.6			37.8	0.61	42.5	0.68	
May	31	14.8	1.6	3.6	3.4	0.291	12.7			16.1	0.25	26.0	0.40	
Jun	30	5.6	0.6	1.4	1.3	0.157	6.9			8.2	0.13	16.9	0.27	
Jul	31	4.0	0.4	0.9	0.9	0.084	3.7			4.6	0.07	16.0	0.25	
Ago	31	11.4	1.3	2.9	2.7	0.046	2.0			4.7	0.07	13.5	0.21	
Set	30	33.0	3.2	7.3	6.8	0.025	1.1			7.9	0.13	18.6	0.30	
Oct	31	63.8	7.4	20.8	19.3			0.000	0.0	19.3	0.30	18.1	0.28	
Nov	30	71.0	8.9	26.2	24.2			0.050	2.5	21.7	0.35	23.4	0.38	
Dic	31	110.4	21.7	70.3	64.8			0.300	15.0	49.8	0.77	34.3	0.53	
MAX.		132.8								78.7	1.36	73.3	1.14	
MIN.		4.0								4.6	0.07	13.5	0.21	
PROM.											0.51		0.51	
SUMA		741.8	134.2	417.9	385.8	1.141	50.0	1.00	50.0	385.8		385.0		

e. Estimación de la precipitación efectiva - cuenca Mchique ($C_e = 0.45$)

Al igual que en la cuenca Anya, la simulación de los caudales medios mensuales en la cuenca Mchique se realizó con la información multianual acumulada de PISCO (1981-2016) que resultó 728.9 mm. La cuenca Mchique tiene una superficie colectora hasta el punto de aforo de 25.62 km². En el cálculo de la Precipitación efectiva con los polinomios de 5to. Grado propuestos por el USBR se utilizaron los polinomios de las curvas II y III para 0.30 y 0.45 de coeficiente de escorrentía (Tabla 23) considerándose un coeficiente de escorrentía promedio anual en la cuenca de 0.45 como resultado de utilizar la fórmula de Penman (Tabla 84), con lo que se obtuvo una precipitación efectiva acumulada anual de 328 mm., determinándose los coeficientes $C_1 = -2.527$ y $C_2 = 3.527$ respectivamente. La Tabla 90 muestra que el mes de abril provee 30.9 mm y en el mes de setiembre el aporte de la retención es de solo 3.3 mm. La estación seca de la cuenca Mchique es entre los meses de abril y setiembre (similar a Anya) lo cual totaliza 183 días. La precipitación efectiva resultante fue de 328 mm anuales.

Para el cálculo del coeficiente de agotamiento (a) de la cuenca Mchique con la fórmula empírica de Moss que es función del área de la cuenca, se utilizó la fórmula correspondiente a un agotamiento mediano, que en este caso es de 80 mm/año, existiendo una pequeña área de bofedales de aproximadamente 6 ha (60 000 m²), que dio como resultado un $a = 0.0148$. Asimismo, se determinó la contribución positiva (gasto = G) y la contribución negativa (abasto = A) respectivamente de la retención de las cuencas. El porcentaje de abasto de la retención en los meses húmedos en la cuenca Mchique son iguales a los de la cuenca Anya pues pertenecen a la región Junín (Plan Meriss II, 1980).

Tabla 90: Simulación de caudales mensuales, río Mchique - modelo Lutz Scholtz ($C_e = 0.45$)

Mes	N° días del mes	P mm/mes	Precipitación Efectiva				Contribución de la Retención				Caudales Generados		Caudales Observados	
			PE II mm/mes	PE III mm/mes	PE mm/mes	Gasto		Abastecimiento		mm/mes	m3/s	mm/mes	m3/s	
						bi	Gi	ai	Ai					
Ene	31	114.6	23.4	34.3	61.7			0.300	24.0	37.7	0.36	29.0	0.28	
Feb	28	128.8	29.7	44.4	81.4			0.300	24.0	57.4	0.61	27.2	0.29	
Mar	31	111.7	22.2	32.4	58.0			0.050	4.0	54.0	0.52	34.5	0.33	
Abr	30	53.6	5.6	7.4	12.1	0.641	30.9			42.9	0.42	30.4	0.30	
May	31	13.5	1.5	2.1	3.6	0.411	19.8			23.4	0.22	28.9	0.28	
Jun	30	6.2	0.7	1.0	1.7	0.263	12.7			14.4	0.14	25.6	0.25	
Jul	31	3.6	0.4	0.5	0.9	0.169	8.1			9.0	0.09	25.1	0.24	
Ago	31	12.2	1.3	1.9	3.3	0.108	5.2			8.5	0.08	22.8	0.22	
Set	30	35.4	3.4	4.5	7.3	0.069	3.3			10.7	0.11	22.5	0.22	
Oct	31	65.4	7.7	10.4	17.2			0.000	0.0	17.2	0.16	24.0	0.23	
Nov	30	69.7	8.6	11.7	19.6			0.050	4.0	15.6	0.15	23.0	0.23	
Dic	31	114.2	23.3	34.0	61.2			0.300	24.0	37.2	0.36	24.5	0.23	
MAX.										57.4	0.61	34.5	0.33	
MIN.										8.5	0.08	22.5	0.22	
SUMA		728.9	127.9	184.7	328.0	1.661	80.0	1.000	80.0	328.0		317.5	3.1	
PROM.											0.268		0.258	

Los valores obtenidos de caudales promedios anuales simulados y observados son 0.268 y 0.258 m³/s respectivamente, lo cual se explica por el muy cercano coeficiente de escorrentía calculado con la fórmula de Penman Montheith para la cuenca Mchique.

Tabla 91: Simulación de caudales mensuales, río Mchique - modelo Lutz Scholtz ($C_e = 0.44$)

Mes	N° días del mes	P mm/mes	Precipitación Efectiva				Contribución de la Retención				Caudales Generados		Caudales Observados	
			PE II mm/mes	PE III mm/mes	PE mm/mes	Gasto		Abastecimiento		mm/mes	m3/s	mm/mes	m3/s	
						bi	Gi	ai	Ai					
Ene	31	114.6	23.4	34.3	60.3			0.300	24.0	36.3	0.35	29.0	0.28	
Feb	28	128.8	29.7	44.4	79.5			0.300	24.0	55.5	0.59	27.2	0.29	
Mar	31	111.7	22.2	32.4	56.7			0.050	4.0	52.7	0.50	34.5	0.33	
Abr	30	53.6	5.6	7.4	11.8	0.641	30.9			42.7	0.42	30.4	0.30	
May	31	13.5	1.5	2.1	3.5	0.411	19.8			23.3	0.22	28.9	0.28	
Jun	30	6.2	0.7	1.0	1.7	0.263	12.7			14.4	0.14	25.6	0.25	
Jul	31	3.6	0.4	0.5	0.9	0.169	8.1			9.0	0.09	25.1	0.24	
Ago	31	12.2	1.3	1.9	3.2	0.108	5.2			8.4	0.08	22.8	0.22	
Set	30	35.4	3.4	4.5	7.2	0.069	3.3			10.5	0.10	22.5	0.22	
Oct	31	65.4	7.7	10.4	16.9			0.000	0.0	16.9	0.16	24.0	0.23	
Nov	30	69.7	8.6	11.7	19.2			0.050	4.0	15.2	0.15	23.0	0.23	
Dic	31	114.2	23.3	34.0	59.8			0.300	24.0	35.8	0.34	24.5	0.23	
MAX.										55.5	0.59	34.5	0.33	
MIN.										8.4	0.08	22.5	0.22	
SUMA		728.9	127.9	184.7	320.7	1.661	80.0	1.000	80.0	320.7		317.5	3.1	
PROM.											0.262		0.258	

La segunda simulación de los caudales medios mensuales del río Mchique consideró el coeficiente de escorrentía real calculado con los datos registrados en el año 2014. Se visualiza que los caudales promedios anuales son iguales a 0.26 m³/s.

f. Calibración del modelo Lutz Scholtz- cuenca Anya

A continuación, las Tablas 92 y 93 muestran los caudales simulados versus caudales observados (aforados en la estación hidrométrica del río Anya el 2014), así como los errores o discrepancias del modelo cuando el $C_e = 0.47$ y 0.52 respectivamente.

Tabla 92: Escurrimientos y caudales simulados vs observados - cuenca Anya ($C_e = 0.47$)

Mes	Esc. y Caudales Simulados		Esc. y Caudales Observados		Qsim-Qobs	Error (m ³ /s)		
	mm/mes	m ³ /s	mm/mes	m ³ /s		(Qsim-Qobs) ²	Qobs-Qprom	(Qobs-Qprom) ²
Ene	57.40	0.89	60.6	0.94	-0.05	0.00	0.43	0.19
Feb	69.56	1.20	42.0	0.72	0.48	0.23	0.21	0.05
Mar	64.51	1.00	73.3	1.14	-0.14	0.02	0.63	0.40
Abr	36.52	0.59	42.5	0.68	-0.10	0.01	0.17	0.03
May	15.85	0.25	26.0	0.40	-0.16	0.02	-0.11	0.01
Jun	8.09	0.13	16.9	0.27	-0.14	0.02	-0.24	0.06
Jul	4.52	0.07	16.0	0.25	-0.18	0.03	-0.26	0.07
Ago	4.47	0.07	13.5	0.21	-0.14	0.02	-0.30	0.09
Set	7.34	0.12	18.6	0.30	-0.18	0.03	-0.21	0.04
Oct	17.53	0.27	18.1	0.28	-0.01	0.00	-0.23	0.05
Nov	19.46	0.31	23.4	0.38	-0.06	0.00	-0.13	0.02
Dic	43.41	0.68	34.3	0.53	0.14	0.02	0.02	0.00
MAX.	69.561	1.199	73.299	1.141				
MIN.	4.474	0.070	13.519	0.210				
SUMA	348.660	5.58	385.019	6.12	-0.54	0.41	0.00	1.00
PROM.	29.05	0.47	32.08	0.51				
DESV.	24.27	0.40	19.18	0.30				
C.V.	0.8	0.8	0.6	0.6				

Tabla 93: Escurremientos y caudales simulados vs observados - cuenca Anya ($C_e = 0.52$)

Mes	Esc. y Caudales Simulados		Esc. y Caudales Observados		Qsim-Qobs	Error (m ³ /s)		
	mm/mes	m ³ /s	mm/mes	m ³ /s		(Qsim-Qobs) ²	Qobs-Qprom	(Qobs-Qprom) ²
Ene	57.40	0.89	60.6	0.94	-0.05	0.00	0.43	0.19
Feb	69.56	1.20	42.0	0.72	0.48	0.23	0.21	0.05
Mar	64.51	1.00	73.3	1.14	-0.14	0.02	0.63	0.40
Abr	36.52	0.59	42.5	0.68	-0.10	0.01	0.17	0.03
May	15.85	0.25	26.0	0.40	-0.16	0.02	-0.11	0.01
Jun	8.09	0.13	16.9	0.27	-0.14	0.02	-0.24	0.06
Jul	4.52	0.07	16.0	0.25	-0.18	0.03	-0.26	0.07
Ago	4.47	0.07	13.5	0.21	-0.14	0.02	-0.30	0.09
Set	7.34	0.12	18.6	0.30	-0.18	0.03	-0.21	0.04
Oct	17.53	0.27	18.1	0.28	-0.01	0.00	-0.23	0.05
Nov	19.46	0.31	23.4	0.38	-0.06	0.00	-0.13	0.02
Dic	43.41	0.68	34.3	0.53	0.14	0.02	0.02	0.00
MAX.	69.561	1.199	73.299	1.141				
MIN.	4.474	0.070	13.519	0.210				
SUMA	348.660	5.58	385.019	6.12	-0.54	0.41	0.00	1.00
PROM.	29.05	0.47	32.08	0.51				
DESV.	24.27	0.40	19.18	0.30				
C.V.	0.8	0.9	0.6	0.6				

g. Estadísticos de bondad de ajuste del modelo – cuenca Anya

Se calcularon los estadísticos de bondad de ajuste del modelo LS con las simulaciones en los dos casos ($C_e = 0.47$ y $C_e = 0.52$), obteniéndose la Tabla 94 donde se observa que los resultados no son concluyentes debido a que en el primer caso el NSE y el r son mayores que en el segundo caso.

Tabla 94: Indicadores de bondad de ajuste, modelo Lutz Scholtz- cuenca Anya

Coefficiente de esorrentía (C_e)	Indicador	Valor calculado	Calificación de rendimiento
0.47 (Penman)	NSE	0.591	Satisfactorio
	PBIAS	-8.76%	Excelente
	r	0.890	Satisfactorio
0.52 (Datos reg.)	NSE	0.406	Aceptable
	PBIAS	0.97%	Excelente
	r	0.882	Satisfactorio

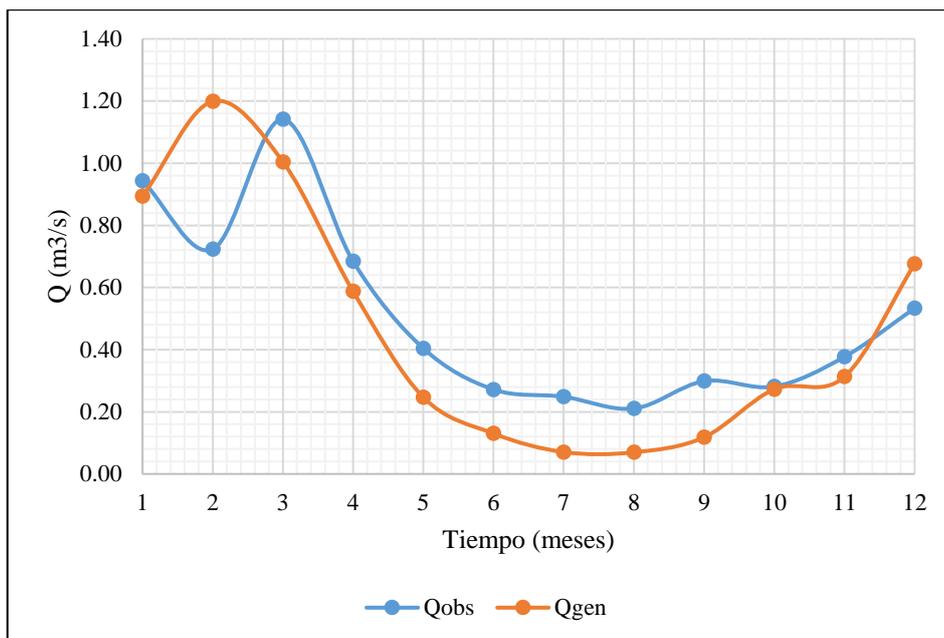


Figura 83: Hidrograma de caudales simulados vs observados, modelo LS – cuenca Anya ($C_c= 0.47$)

La comparación gráfica de hidrogramas de caudales simulados y observados (Figuras 83 y 84), se nota que el modelo LS representa adecuadamente la variación estacional de los caudales del río Anya, es decir, los períodos húmedos y los períodos secos en ambos casos.

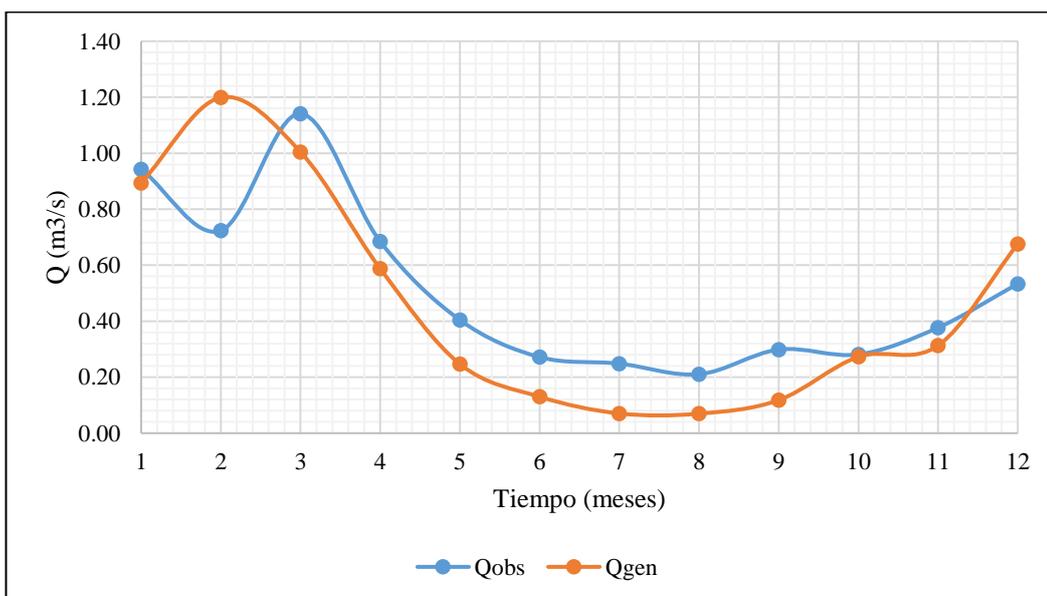


Figura 84: Hidrograma de caudales simulados vs observados, modelo LS – cuenca Anya ($C_c= 0.52$)

h. Ecuación de generación de escurrimientos (Q_t) con $C_e=0.47$, cuenca Anya

Teniendo como base la Tabla 95 con los parámetros del modelo Lutz Scholtz, se estableció la regresión lineal múltiple entre Q_t , Q_{t-1} y PE_t con la opción Datos (Análisis de datos) / Regresión de Excel.

Tabla 95: Parámetros de generación de escurrimientos para períodos extendidos

Mes	Q_t (mm)	Q_{t-1} (mm)	PE_t (mm)
Ene	57.4	43.4	72.4
Feb	69.6	57.4	84.6
Mar	64.5	69.6	67.0
Abr	36.5	64.5	12.9
May	15.8	36.5	3.1
Jun	8.1	15.8	1.2
Jul	4.5	8.1	0.8
Ago	4.5	4.5	2.5
Set	7.3	4.5	6.3
Oct	17.5	7.3	17.5
Nov	19.5	17.5	22.0
Dic	43.4	19.5	58.4
Suma	348.7	348.7	348.7

Luego del análisis de regresión se obtuvo la siguiente ecuación, denominada ecuación de generación de caudales para períodos extendidos:

$$Q_t = 2.089 + 0.3813(Q_{t-1}) + 0.5469(PE_t) + 0.1378(z)$$

Las estadísticas de la regresión se muestran en la Tabla 96:

Tabla 96: Estadísticas de la regresión – simulación con $C_e=0.47$

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple r	0.9977
Coefficiente de determinación r^2	0.9954
r^2 ajustado	0.9943
Error típico	1.8285
Observaciones	12

i. Calibración del modelo Lutz Scholtz – cuenca Mchique

Las Tablas 97 y 98 contienen los errores entre los caudales observados y los simulados con el modelo Lutz Scholtz, los cuales sirven para calcular los estadísticos de bondad de ajuste del modelo

Tabla 97: Escurrecimientos y caudales simulados vs observados - cuenca Mchique ($C_e = 0.45$)

Mes	Esc. y Caudales Simulados		Esc. y Caudales Observados		Qsim-Qobs	Error (mm)		
	mm/mes	m ³ /s	mm/mes	m ³ /s		(Qsim-Qobs) ²	Qobs-Qprom	(Qobs-Qprom) ²
Ene	37.68	0.36	28.97	0.28	0.0832	0.0069	0.0190	0.0004
Feb	57.41	0.61	27.22	0.29	0.3195	0.1021	0.0301	0.0009
Mar	53.99	0.52	34.50	0.33	0.1863	0.0347	0.0718	0.0052
Abr	42.94	0.42	30.38	0.30	0.1241	0.0154	0.0421	0.0018
May	23.36	0.22	28.86	0.28	-0.0526	0.0028	0.0179	0.0003
Jun	14.42	0.14	25.64	0.25	-0.1109	0.0123	-0.0047	0.0000
Jul	9.03	0.09	25.11	0.24	-0.1537	0.0236	-0.0179	0.0003
Ago	8.49	0.08	22.83	0.22	-0.1370	0.0188	-0.0398	0.0016
Set	10.65	0.11	22.51	0.22	-0.1171	0.0137	-0.0356	0.0013
Oct	17.23	0.16	23.99	0.23	-0.0647	0.0042	-0.0286	0.0008
Nov	15.60	0.15	23.00	0.23	-0.0731	0.0053	-0.0308	0.0009
Dic	37.20	0.36	24.53	0.23	0.1212	0.0147	-0.0235	0.0006
MAX.	57.41	0.61	34.50	0.33				
MIN.	8.49	0.08	22.51	0.22				
SUMA	328.00	3.22	317.54	3.10	0.125	0.254	0.000	0.014
PROM.	27.33	0.268	26.46	0.258				
DESV.	17.72	0.18	3.64	0.04				
C.V	0.65	0.67	0.14	0.14				

Tabla 98: Escurrecimientos y caudales simulados vs observados - cuenca Mchique ($C_e = 0.44$)

Mes	Esc. y Caudales Simulados		Esc. y Caudales Observados		Qsim-Qobs	Error (mm)		
	mm/mes	m ³ /s	mm/mes	m ³ /s		(Qsim-Qobs) ²	Qobs-Qprom	(Qobs-Qprom) ²
Ene	36.29	0.35	28.97	0.28	0.0699	0.0049	0.0190	0.0004
Feb	55.53	0.59	27.22	0.29	0.2995	0.0897	0.0301	0.0009
Mar	52.69	0.50	34.50	0.33	0.1739	0.0302	0.0718	0.0052
Abr	42.70	0.42	30.38	0.30	0.1218	0.0148	0.0421	0.0018
May	23.28	0.22	28.86	0.28	-0.0533	0.0028	0.0179	0.0003
Jun	14.38	0.14	25.64	0.25	-0.1113	0.0124	-0.0047	0.0000
Jul	9.01	0.09	25.11	0.24	-0.1539	0.0237	-0.0179	0.0003
Ago	8.42	0.08	22.83	0.22	-0.1377	0.0190	-0.0398	0.0016
Set	10.51	0.10	22.51	0.22	-0.1186	0.0141	-0.0356	0.0013
Oct	16.88	0.16	23.99	0.23	-0.0680	0.0046	-0.0286	0.0008
Nov	15.20	0.15	23.00	0.23	-0.0770	0.0059	-0.0308	0.0009
Dic	35.82	0.34	24.53	0.23	0.1079	0.0117	-0.0235	0.0006
MAX.	55.53	0.59	34.50	0.33				
MIN.	8.42	0.08	22.51	0.22				
SUMA	320.71	3.15	317.54	3.10	0.053	0.234	0.000	0.014
PROM.	26.73	0.262	26.46	0.258				
DESV.	17.16	0.17	3.64	0.04				
C.V	0.64	0.66	0.14	0.14				

j. Estadísticos de bondad de ajuste del modelo – cuenca Mchique

Se analizó la bondad de ajuste del modelo Lutz Scholtz en la cuenca Mchique, a través del cálculo de los coeficientes de eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE), porcentaje del sesgo (PBIAS) y coeficiente de correlación (r), cuyo resumen se presentan en la Tabla 99 para las dos simulaciones realizadas, encontrándose en ambos casos que la eficiencia de Nash- Sutcliffe (NSE) tiene un mal rendimiento. La variabilidad de los caudales observados a lo largo del año 2014, está en duda en el caso de esta cuenca, porque el comportamiento graficado en los histogramas, no corresponde a lo que ocurre en las cuencas interandinas del país en la temporada de lluvias, lo cual se explica a través de los resultados del análisis morfométrico: la cuenca Mchique pertenece a la cordillera occidental y sus suelos están conformados por rocas sedimentarias calizas y areniscas; en cambio, la cuenca Anya pertenece a la cordillera central y posee abundancia de material metamórfico. Se concluye que las características geológicas difieren en ambas cuencas y que por lo tanto la respuesta hidrológica es diferente existiendo un riesgo de avenidas moderadas en Anya y bajas en Mchique lo cual afecta la forma de los hidrogramas. Por esta razón no es posible buscar ecuaciones de generación de caudales en períodos extendidos con el modelo Lutz Scholtz.

Tabla 99: Indicadores de bondad de ajuste del modelo Lutz Scholtz- cuenca Mchique

Coefficiente de escorrentía (C_e)	Indicador	Valor calculado	Calificación de rendimiento
0.45 (Penman)	NSE	-17.144	Malo
	PBIAS	4.04%	Excelente
	r	0.810	Satisfactorio
0.44 (Datos reg.)	NSE	-15.668	Malo
	PBIAS	1.72%	Excelente
	r	0.819	Satisfactorio

Respecto a los otros indicadores de bondad de ajuste, se verifica que mejoran al utilizar el coeficiente de escorrentía igual a 0.44. Además, debido a la poca diferencia entre los coeficientes de escorrentía, los histogramas no presentan diferencias significativas, por lo cual no se consideró colocar ambos histogramas, solo el de la Figura 85.

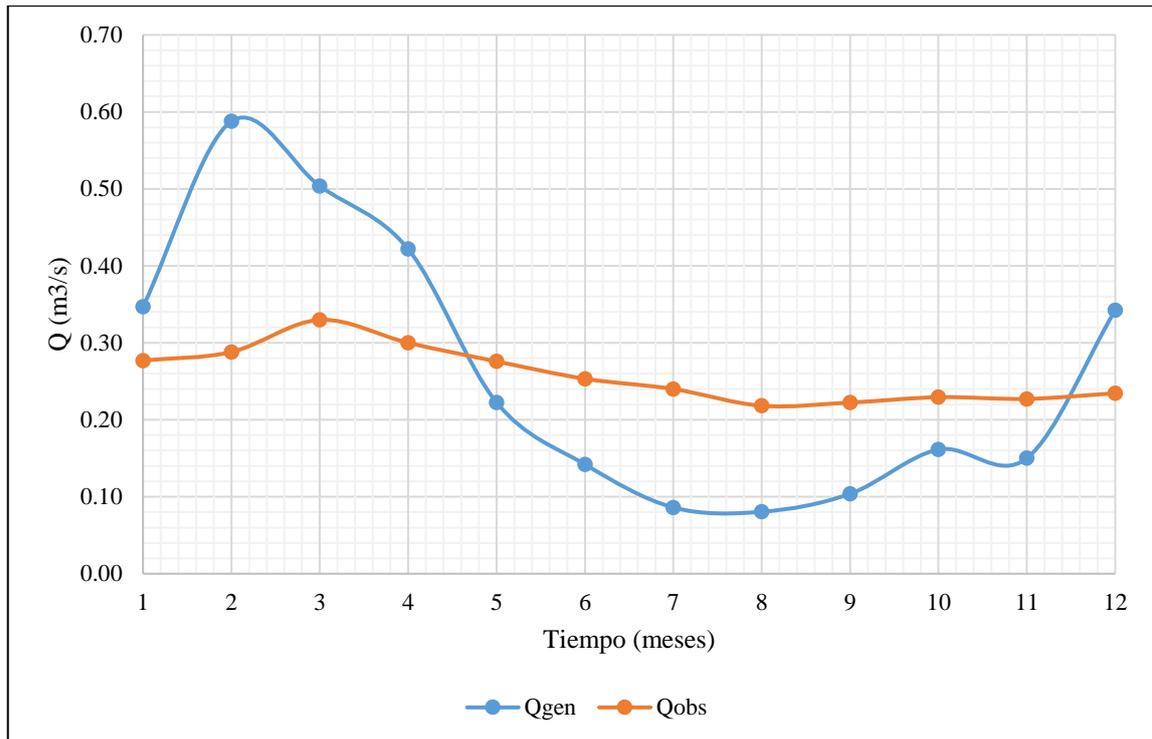


Figura 85: Hidrograma de caudales sim vs obs, modelo LS – cuenca Mchique ($C_e=0.44$)

4.3.2. Modelamiento hidrológico con SWAT

Como primer paso, se descargó el Modelo de Elevación Digital (MED) ubicando una ventana de coordenadas que contienen a las cuencas Anya y Michique (extensión de búsqueda). Se utilizó el Modelo de Elevación Digital Global del satélite ASTER (GDEM) Versión 3 (ASTGTM) descargado del siguiente enlace: <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/> con una resolución espacial de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros de posición horizontal en el ecuador).

La cobertura de la imagen satelital posee una extensión amplia (50 x 70 km) por lo cual, se hizo necesario ubicar el ámbito de estudio perteneciente a ambas cuencas utilizando la opción Mask del programa SWAT. Previamente, se independizó cada cuenca utilizando un SIG con el programa Arc Map 10.4, para trabajar cada cuenca de forma separada.

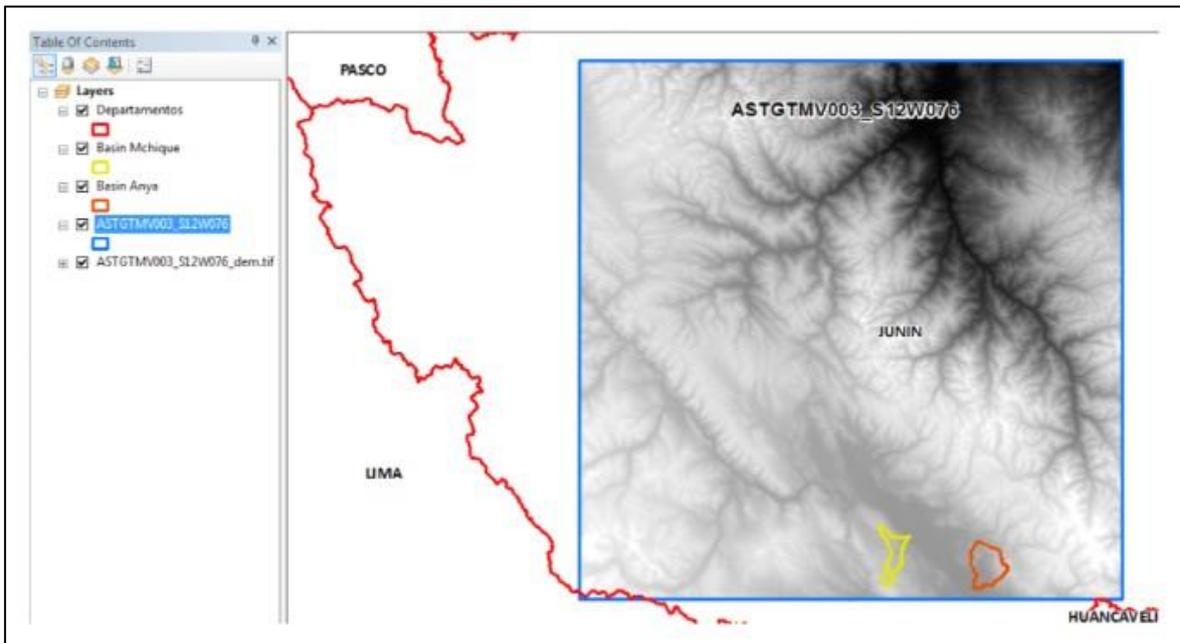


Figura 86: Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio

FUENTE: <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/>

Se muestra el DEM completo descargado (Figura 86) y los DEM's de las áreas definidas de cada cuenca a través del proceso de recorte o enmascaramiento (figuras 87 y 88).

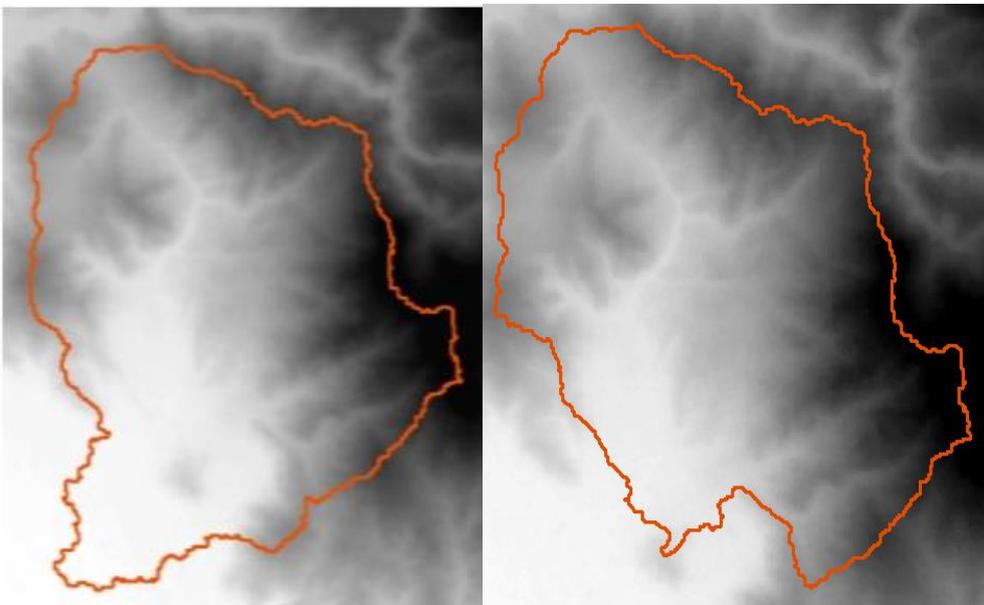


Figura 87: Delimitación de la cuenca Anya (izq. Hasta el río Mantaro, der. Hasta punto de aforo)

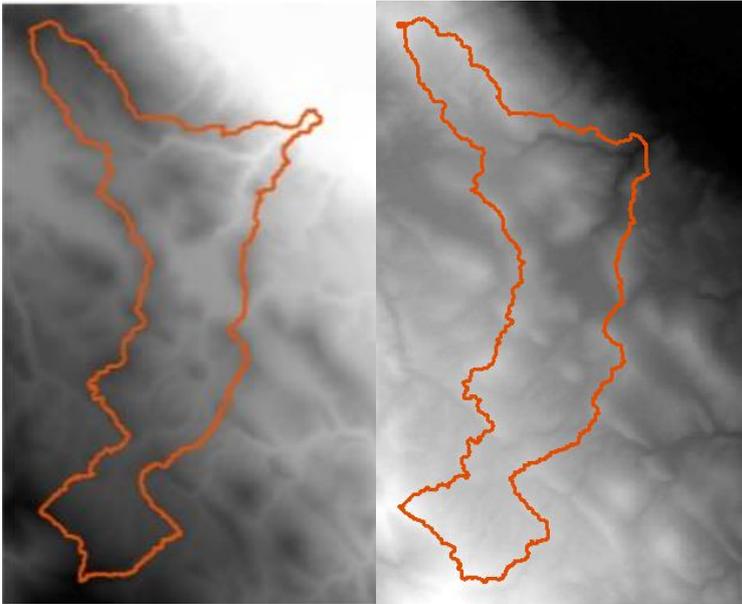


Figura 88: Delimitación de la cuenca Mchique (izq. Hasta el río Mantaro, der. Hasta punto de aforo)

a. Preparación y entrada de datos para la simulación

En cuanto a las variables climáticas, la información que necesitó SWAT para realizar la simulación fue series de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar diarias, cada variable en formato de texto (cvs.). Se consideró un período de calentamiento “warm-up” de 5 años, considerándose la longitud de los datos PISCO, debe tenerse en cuenta la recomendación de que, para longitudes de datos de 5 años a menos años, debe observarse un período de calentamiento de 1 año. Respecto a los parámetros de simulación, se probaron variaciones respecto de unos valores iniciales “por defecto” que tiene el programa SWAT. A continuación, se adjunta un resumen de parámetros utilizados (Tabla 100) en algunas simulaciones realizadas en la cuenca Anya.

Tabla 100: Parámetros de simulación del programa SWAT – cuenca Anya

Ítem	Parámetro	Definición	Valor inicial	Muestra de simulaciones realizadas		
				S05	S07	S15
1	*R_CN2.mgt	Número de Curva del SCS para la condición II de humedad.	*	*	*	*
2	V_ALPHABF.gw	Factor alpha del flujo base (d).	0.048	0.02	0.048	0.048
3	V_GWDELAY.gw	Desfase agua subterránea (d).	31	365	31	210
4	V_GWQMIN.gw	Nivel del umbral freático para iniciar flujo de rETorno (mm).	1000	500	1000	1000
5	V_GWREVAP.gw	Coefficiente de revalorización del agua subterránea.	0.02	0.2	0.02	0.02
6	V_RCHRGDP.gw	Fracción de percolación del acuífero profundo.	0.05	0.05	0.05	0.05
7	V_REVAPMN.gw	Profundidad del acuífero superficial para producir revap. (mm).	750	750	750	750
8	V_CANMX.hru	Almacenamiento máximo de la cubierta vegetal.	0	0	0	0
9	V_ESCO.hru	Factor de compensación de ET del suelo.	1	0.95	0.95	0.95
10	V_EPCO.hru	Factor de compensación de la captación de las plantas.	1	1	1	1
11	R_OVN.hru	N. de Manning para el flujo superficial.	0.1	0.1	0.01	0.1
12	R_CHN2.rte	N. de Manning del cauce principal.	0.014	0.014	0.014	0.038
13	*R_SOLK.sol	Conductividad hidráulica saturada (mm h-1)	*	*	*	*

*Varía de acuerdo al tipo de suelo

b. Resultados de la simulación

La simulación permitió obtener como variables de salida a los caudales medios diarios del río Anya y del río Mchique en una longitud de 36 años (1981 – 2016), sin embargo, al no tener caudales registrados de la misma longitud, tuvimos que compararlos con los caudales registrados en sus respectivas estaciones hidrométricas. De acuerdo a la cantidad de datos de caudales registrados (observados) en las cuencas Anya y Mchique, el período de registro fue del 01 de diciembre de 2013 al 31 de marzo del 2015, por lo que se tomó como período de calibración al 01 de diciembre de 2013 al

30 de noviembre de 2014 (12 meses) y como período de validación al 01 de diciembre de 2014 al 31 de marzo de 2015 (04 meses).

El resultado de la comparación de hidrogramas permitió determinar si SWAT realizó una buena representación de los caudales medios diarios generados por la cuenca, a través de sucesivas simulaciones, esto se pudo observar mediante la comparación gráfica. Las Figuras 89, 90 y 91 muestran el comparativo gráfico de hidrogramas de 03 simulaciones realizadas (tomadas al azar) en la cuenca Anya.

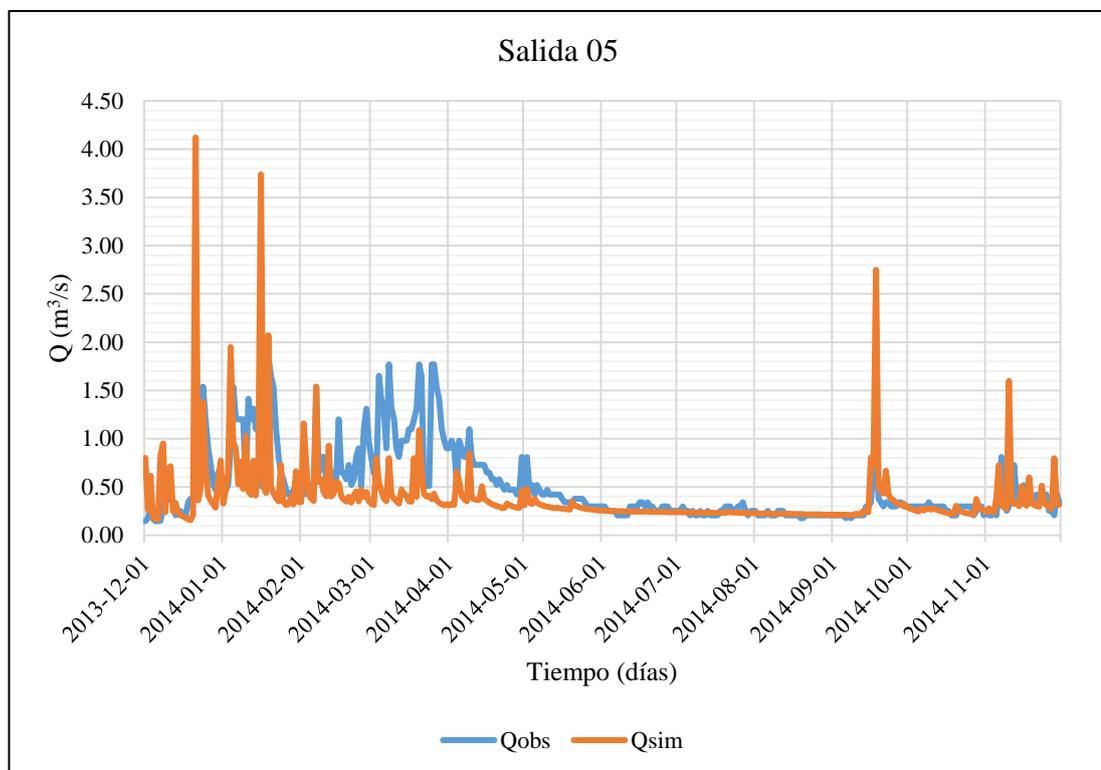


Figura 89: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m^3/s), cuenca Anya (Salida 05)

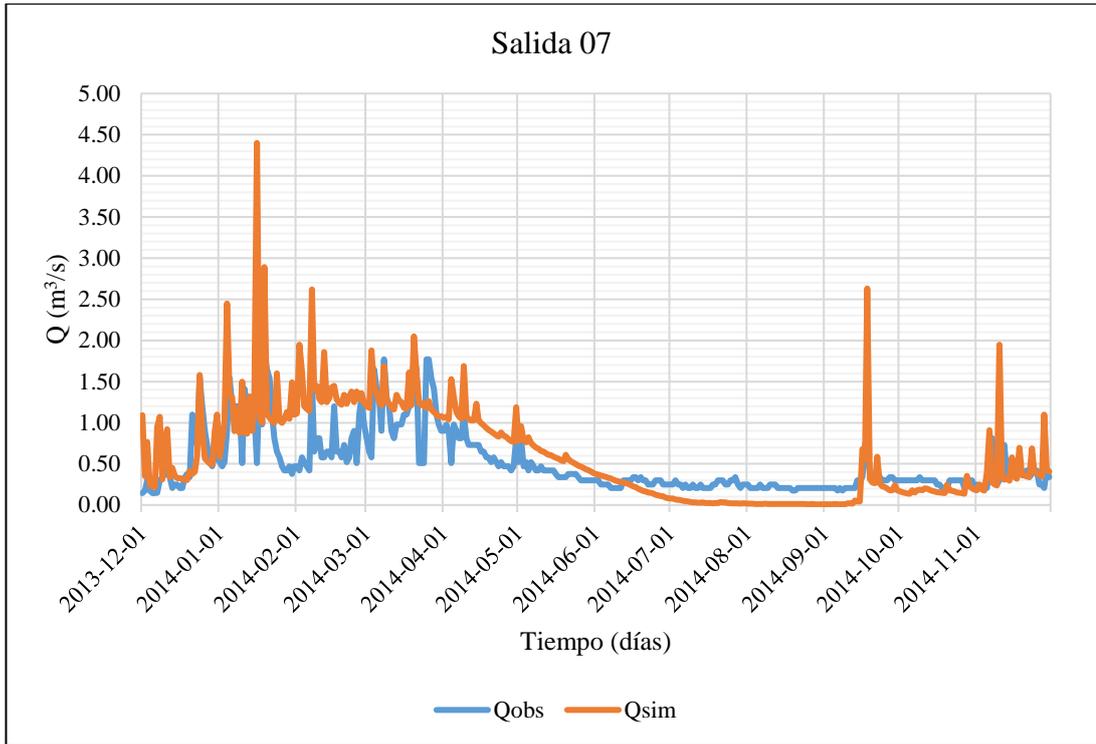


Figura 90: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m^3/s), cuenca Anya (Salida 07)

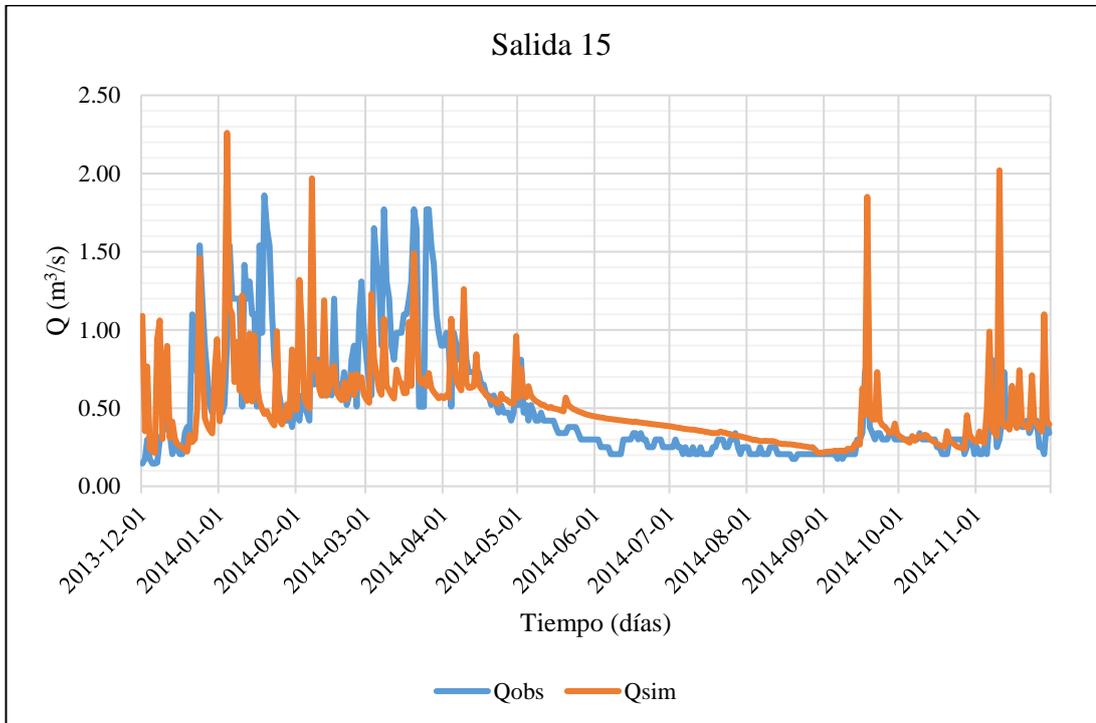


Figura 91: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m^3/s), cuenca Anya (Salida 15)

En la simulación 05 se puede verificar que existe una mejor capacidad predictiva del modelo SWAT para reproducir adecuadamente el flujo base, sin embargo, los caudales máximos son sobre estimados; en la simulación 07 el flujo base en los meses húmedos aumenta drásticamente lo cual es un indicativo de que había que modificar algún parámetro de extensión gw (agua subterránea). Se realizaron sucesivas simulaciones tratando de mejorar el comportamiento del modelo con respecto a los caudales observados en la estación limnimétrica del río Anya. Al llegar a la simulación 15 se puede verificar que se mejora notablemente la correspondencia entre los caudales simulados y observados en el período húmedo y la época de estiaje. Asimismo, para comprobar la bondad de ajuste del modelo en las etapas de calibración y validación, se realizó el cálculo de los indicadores estadísticos tales como el porcentaje del sesgo (PBIAS), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y coeficiente de determinación de Pearson (r^2). Los resultados de los cálculos realizados se muestran en la Tabla 101:

Tabla 101: Bondad de ajuste estadístico a nivel diario modelo SWAT – cuenca Anya

Estadísticos de rendimiento	Muestra de simulaciones						
	S05	S07	S10	S11	S13	S15	
Calibración	PBIAS	-22.10%	-20.60%	-9.60%	-4.30%	-10.70%	16.0%
	NSE	-0.024	-0.056	0.244	0.292	0.269	0.08
	r	0.382	0.696	0.400	0.432	0.638	0.53
Validación	PBIAS	-33.50%	-30.70%	-16.20%	-11.80%	-1.80%	-0.87%
	NSE	0.341	0.376	0.392	0.421	-0.348	0.434
	r	0.996	0.997	0.997	0.997	0.998	0.998

En la Tabla 101 se puede verificar que los indicadores estadísticos han ido mejorando en cada simulación hasta llegar a la simulación 15, en donde, para la etapa de calibración los resultados son: PBIAS = 16% (Satisfactorio), NSE = 0.08 (Malo) y $r = 0.53$ (Satisfactorio). En la etapa de validación del modelo en la misma simulación se obtuvo un PBIAS = -0.87% (Excelente), el NSE = 0.434 (Aceptable) y el $r = 0.998$ (Satisfactorio), existiendo contrariedad solo en el indicador NSE, para las etapas de calibración y validación.

De acuerdo a la cantidad de datos que manejamos, el período de validación abarca la temporada de meses húmedos desde diciembre de 2014 a marzo de 2015, por lo cual podemos certificar que el valor del coeficiente de correlación entre los caudales

simulados y observados es Muy Alto en todas las simulaciones realizadas. Asimismo, se realizó el consolidado mensual de los caudales simulados con el modelo SWAT en la cuenca Anya, los cuales se calibraron con respecto a los valores observados y que se han colocado en la Tabla 102, con cuyos valores se han calculado los indicadores estadísticos de bondad de ajuste del modelo de manera mensual.

Tabla 102: Caudales (m^3/s) simulados con SWAT vs observados (mensuales) - cuenca Anya

Mes	Q _{obs}	Q _{sim}	Q _{sim} -Q _{obs}	(Q _{sim} -Q _{obs}) ²	Q _{obs} -Q _{prom}	(Q _{obs} -Q _{prom}) ²
Ene	0.94	0.77	-0.18	0.03	0.43	0.19
Feb	0.72	0.79	0.06	0.00	0.21	0.05
Mar	1.14	1.11	-0.03	0.00	0.63	0.40
Abr	0.68	0.75	0.07	0.00	0.17	0.03
May	0.40	0.61	0.21	0.04	-0.11	0.01
Jun	0.27	0.51	0.23	0.05	-0.24	0.06
Jul	0.25	0.39	0.14	0.02	-0.26	0.07
Ago	0.21	0.31	0.10	0.01	-0.30	0.09
Set	0.30	0.34	0.04	0.00	-0.21	0.04
Oct	0.28	0.31	0.03	0.00	-0.23	0.05
Nov	0.38	0.42	0.04	0.00	-0.13	0.02
Dic	0.53	0.78	0.25	0.06	0.02	0.00
Suma	6.12	7.09	0.97	0.24	0.00	1.00
Prom.	0.51	0.59	0.08	0.02	0.00	0.08
Máximo	1.14	1.11				
Mínimo	0.21	0.31				
Desv.	0.30	0.25				
C.V.	0.59	0.42				

La Tabla 103 muestra los indicadores estadísticos de bondad de ajuste en el consolidado mensual, resultando positivos en todos los casos.

Tabla 103: Indicadores de bondad de ajuste del modelo SWAT mensual - cuenca Anya

Indicador	Valor calculado	Calificación de rendimiento
NSE	0.76	Bueno
PBIAS	15.90%	Excelente
r	0.92	Satisfactorio

Se presentan los resultados promedio mensuales multianuales para ambas cuencas. El balance hídrico simulado por SWAT para el periodo 1981-2016, muestra que, en Anya, existe un déficit de agua en los meses mayo a octubre, que es cuando la precipitación pluvial fue inferior a la evapotranspiración potencial. El agua de entrada está definida por la precipitación (mm) que ingresa a las cuencas; el agua de salida la conforman la escorrentía superficial (Tabla 104 y Figura 92), flujo lateral y la evapotranspiración (Arnold *et al.* 2012). En la cuenca Anya del total de agua de entrada (751.8 mm), el 59% se convierte en caudal que contribuye al río que lleva el mismo nombre, cabe resaltar que para el modelamiento con SWAT se ha actualizado el mapa de cobertura vegetal al 2019 por lo que el coeficiente de escorrentía cambió. La erosión hídrica tiene valores más altos en los meses de enero a abril con 21.5, 34.1, 19.4, 9.7 y 9.2 t/ha respectivamente, que corresponde a los meses de altas precipitaciones. La suma de erosiones mensuales resulta en la erosión total anual que produce 122.3 t/ha/año, representando niveles de erosión considerable (FAO 1979).

Tabla 104: Balance hídrico de la cuenca Anya (resultados de la simulación 15)

MES	PP (mm)	ESC. SUP (mm)	FLUJO LAT. (mm)	PROD. AGUA (mm)	ET (mm)	EROSIÓN HID. (t/ha)	ET ₀ (mm)
Ene	115.3	10.6	17.0	50.5	24.5	21.5	28.6
Feb	138.3	17.1	18.9	62.6	29.7	34.1	33.5
Mar	119.6	11.1	17.2	62.4	41.0	19.4	52.7
Abr	61.9	4.4	8.2	48.0	40.2	9.2	72.5
May	14.4	0.1	1.5	36.4	26.6	0.2	111.1
Jun	5.6	0.0	0.3	29.3	12.4	0.0	125.8
Jul	3.3	0.0	0.2	23.9	7.4	0.0	132.5
Ago	12.9	0.0	0.6	20.1	9.5	0.1	113.7
Set	30.8	0.2	1.7	18.5	16.8	0.5	78.1
Oct	63.1	1.7	5.2	22.6	29.5	3.4	54.9
Nov	66.8	3.6	7.5	26.3	26.9	6.9	40.2
Dic	119.9	13.9	14.6	46.3	23.8	27.1	29.1
Total	751.8	62.8	92.7	446.8	288.3	122.3	872.6

Donde: PP = Precipitación, ESC. SUP. = Escorrentía superficial, FLUJO LAT. = Flujo lateral, ET = Evapotranspiración, PROD. AGUA = Producción de agua, EROSIÓN HID. = Erosión hídrica, ET₀ = Evapotranspiración potencial.

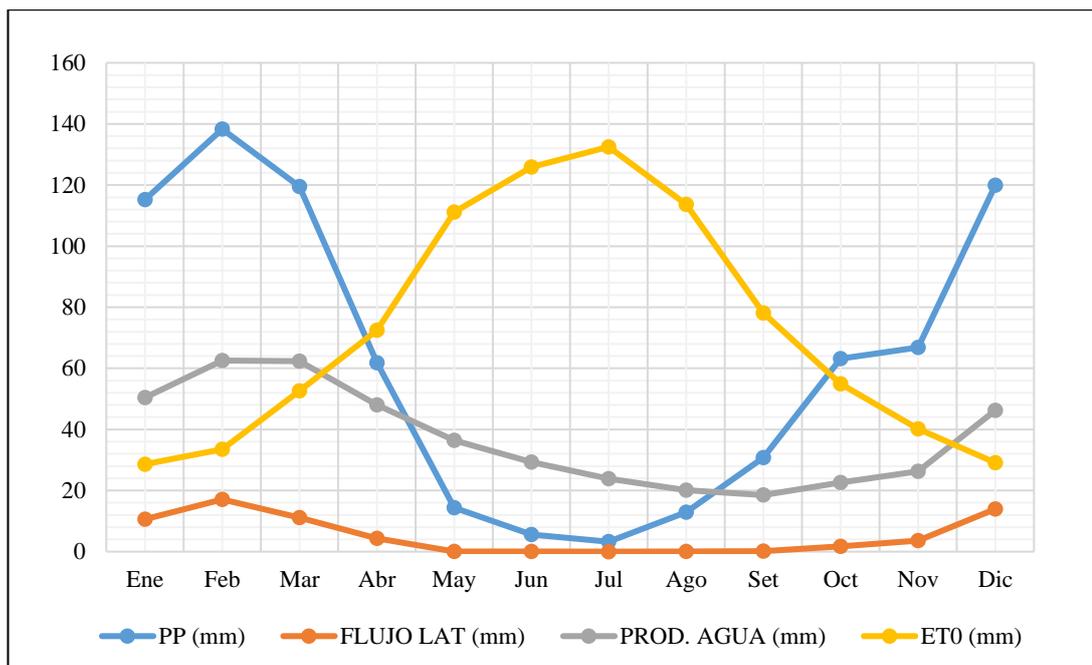


Figura 92: Resultados de las variables simuladas (Salida 15) – cuenca Anya

En el caso de la cuenca Mchique, los parámetros de simulación utilizados en algunas corridas se muestran en la Tabla 105:

Tabla 105: Parámetros de simulación del programa SWAT – cuenca Mchique

Item	Parámetro	Definición	Valor inicial	Muestra de simulaciones realizadas		
				S02	S05	S06
1	*R_CN ₂ .mgt	Número de Curva del SCS para la condición II de humedad.	*	72	66	79
2	V_ALPHABF.gw	Factor alpha del flujo base (d).	0.048	0.02	0.02	0.02
3	V_GWDELAY.gw	Desfase agua subterránea (d).	31	380	365	365
4	V_GWQMIN.gw	Nivel del umbral freático para iniciar flujo de retorno (mm).	1000	500	500	500
5	V_GWREVP.gw	Coefficiente de revalorización del agua subterránea.	0.02	0.2	0.2	0.2
6	V_RCHRGDP.gw	Fracción de percolación del acuífero profundo.	0.05	0.01	0.05	0.01
7	V_REVAPMN.gw	Profundidad del acuífero superficial para producir revap. (mm)	750	350	350	350
8	V_CANMX.hru	Almacenamiento máximo de la cubierta vegetal.	0	0	0	0
9	V_ESCO.hru	Factor de compensación de ET del suelo.	0.95	0.7	0.7	0.7
10	V_EPCO.hru	Factor de compensación de la captación de las plantas.	1	1	1	1
11	R_OVN.hru	N. de Manning para el flujo superficial.	0.1	0.01	0.01	0.01
12	R_CHN ₂ .rte	N. de Manning del cauce principal.	0.014	0.038	0.038	0.038
13	*R_SOLK.sol	Conductividad hidráulica saturada (mm.h ⁻¹).	*	*	25	30

* Varía según tipo de suelo

Para la cuenca Mchique se pueden observar las Figuras 93, 94 y 95, que corresponde a los histogramas de caudales observados versus simulados obtenidos de las “mejores” simulaciones realizadas, es decir, aquellas simulaciones que arrojaron los mejores estadísticos.

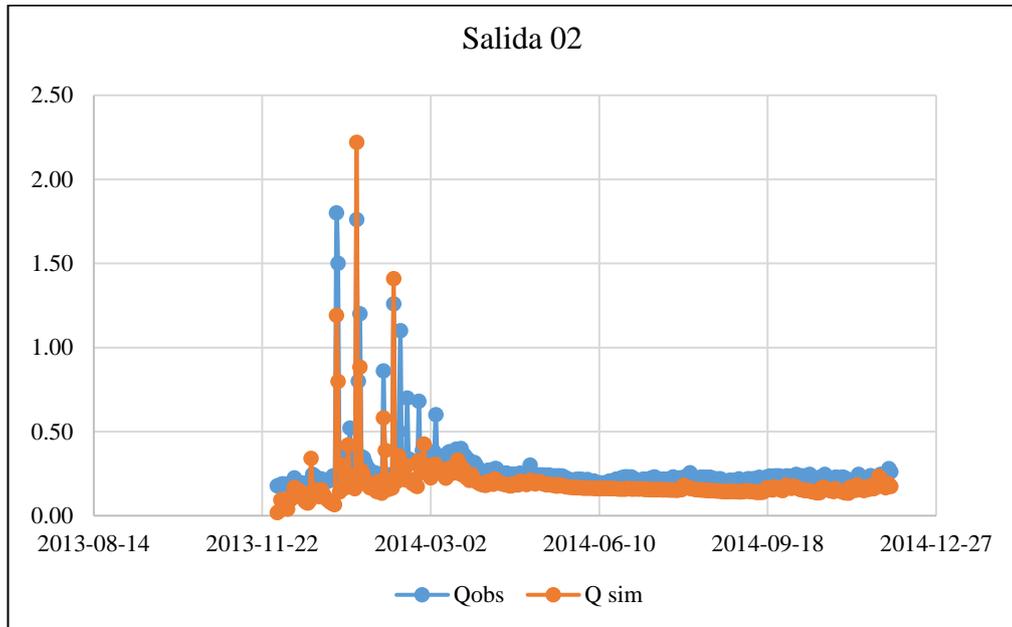


Figura 93: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m^3/s), cuenca Mchique (Salida 2)

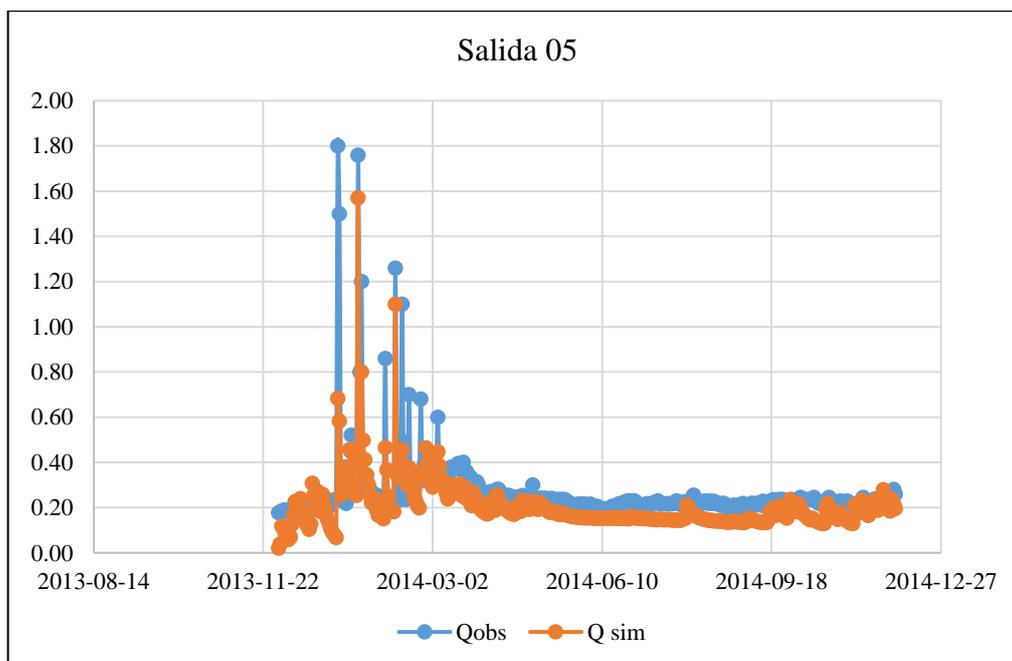


Figura 94: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m^3/s), cuenca Mchique (Salida 5)

Como se puede observar en las tres figuras resultantes de la calibración, que los caudales simulados diarios respresentan muy bien la naturaleza estacional de los caudales observados en la cuenca Mchique, ya que los mayores caudales corresponden al tiempo de crecidas y lluvias máximas; los caudales mínimos ocurren en tiempo de estiaje.

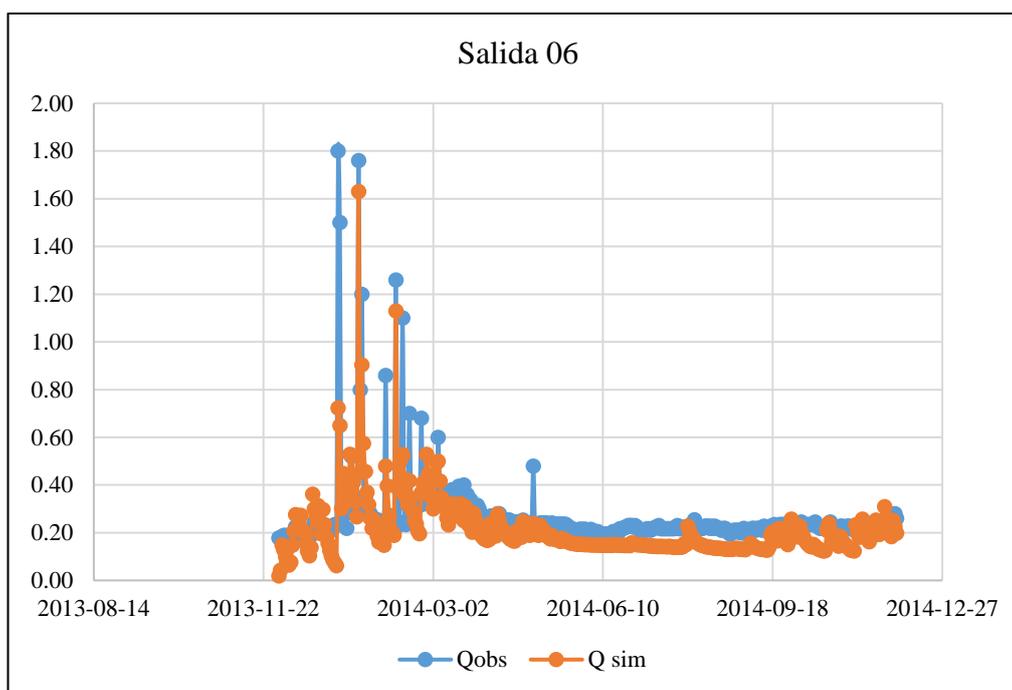


Figura 95: Hidrograma de caudales observados vs simulados (m^3/s), cuenca Mchique (Salida 6)

A continuación, se colocó la Tabla 106 que contiene el consolidado de los estadísticos calculados para las etapas de calibración y validación en la cuenca Mchique.

Tabla 106: Bondad de ajuste estadístico a nivel diario modelo SWAT – cuenca Mchique

Estadísticos de rendimiento		Simulación 6
Calibración	PBIAS	-8.50%
	NSE	-20.09
	r	0.37
Validación	PBIAS	41.00%
	NSE	-273.13
	r	0.99

La simulación 6 (S6) representa “mejor” los caudales diarios ocurridos en la cuenca Mchique. Sin embargo, solo el 33.3% de los indicadores son buenos en la etapa de calibración y validación (PBIAS en calibración y r en validación). Además, se realizó el consolidado mensual de los caudales simulados con el modelo SWAT en la cuenca Mchique, los cuales se calibraron con respecto a los valores observados y se han colocado en la Tabla 107, con cuyos valores se han calculado los indicadores estadísticos de bondad de ajuste del modelo encontrándose que los indicadores mejoran a un 66.6%.

Tabla 107: Caudales simulados con SWAT vs observados (mensuales) - cuenca Mchique

Mes	Q _{obs}	Q _{sim}	Q _{sim} -Q _{obs}	(Q _{sim} -Q _{obs}) ²	Q _{obs} -Q _{prom}	(Q _{obs} -Q _{prom}) ²
Ene	0.28	0.36	0.08	0.01	0.02	0.000
Feb	0.29	0.52	0.23	0.05	0.03	0.001
Mar	0.35	0.45	0.10	0.01	0.09	0.007
Abr	0.30	0.25	-0.05	0.00	0.03	0.001
May	0.28	0.22	-0.06	0.00	0.01	0.000
Jun	0.25	0.17	-0.09	0.01	-0.01	0.000
Jul	0.24	0.14	-0.10	0.01	-0.02	0.000
Ago	0.22	0.12	-0.09	0.01	-0.04	0.002
Set	0.22	0.12	-0.10	0.01	-0.04	0.002
Oct	0.23	0.13	-0.10	0.01	-0.03	0.001
Nov	0.23	0.15	-0.08	0.01	-0.03	0.001
Dic	0.26	0.18	-0.09	0.01	0.00	0.000
Sumatoria	3.14	2.80	-0.35	0.14	0.00	0.016
Promedio	0.26	0.23	-0.03	0.01	0.00	0.001
Máximo	0.35	0.52				
Mínimo	0.22	0.12				
Desv.	0.04	0.14				
C.V.	0.15	0.58				

La Tabla 108 contiene los indicadores estadísticos de bondad de ajuste en el consolidado mensual, resultando positivo en dos casos, sin embargo, el coeficiente de variación obtenido con el modelo es muy alto si se compara con el observado, con lo cual se puede inferir que existe un problema con los datos de caudales medidos in situ en el río Mchique, porque no se visualizan las crecidas de los meses húmedos.

Tabla 108: Indicadores de bondad de ajuste del modelo SWAT mensualizado - cuenca Mchique

Indicador	Valor calculado	Calificación de rendimiento
NSE	-7.40	Malo
PBIAS	-0.11%	Excelente
r	0.82	Satisfactorio

Pese a los resultados obtenidos, se reporta el balance hídrico para la mejor simulación realizada, el que puede verse en la Tabla 109.

Tabla 109: Balance hídrico de la cuenca Mchique (resultados de la simulación 6)

Mes	PP (mm)	ESC. SUP. (mm)	FLUJO LAT. (mm)	PROD. AGUA (mm)	ET (mm)	EROSIÓN HID. (tn/ha)	ET ₀ (mm)
Ene	87.8	8.4	8.9	27.3	26.4	9.2	34.4
Feb	117.6	19.2	12.5	43.0	31.8	24.4	40.6
Mar	113.2	16.1	12.3	43.7	42.7	21.0	60.7
Abr	23.0	0.7	4.2	21.3	38.0	0.9	95.5
May	6.3	0.0	0.8	17.0	23.5	0.0	129.1
Jun	1.3	0.0	0.2	14.0	13.1	0.0	139.0
Jul	1.6	0.0	0.1	13.1	8.3	0.0	142.1
Ago	2.8	0.0	0.1	12.0	7.1	0.0	135.3
Set	14.9	0.0	0.5	11.2	9.5	0.0	95.8
Oct	30.0	0.1	1.6	12.1	15.3	0.1	67.3
Nov	34.5	0.3	2.4	12.0	16.7	0.2	54.6
Dic	72.5	3.0	5.2	17.5	20.1	2.7	36.0
TOTAL	505.4	47.7	48.8	244.1	252.5	58.6	1030.3

Donde: PP = Precipitación, ESC. SUP. = Escorrentía superficial, FLUJO LAT. = Flujo lateral, ET = Evapotranspiración, PROD. AGUA = Producción de agua, EROSIÓN HID. = Erosión hídrica, ET₀ = Evapotranspiración potencial.

En la cuenca Mchique del total de agua de entrada (505.4 mm), el 48.3% se convierte en caudal que contribuye al río que lleva el mismo nombre, es decir, al río Mchique (Figura 96). La erosión hídrica asciende a un total de 58.6 t/ha/año en la cuenca, representando niveles de erosión media (FAO 1979).

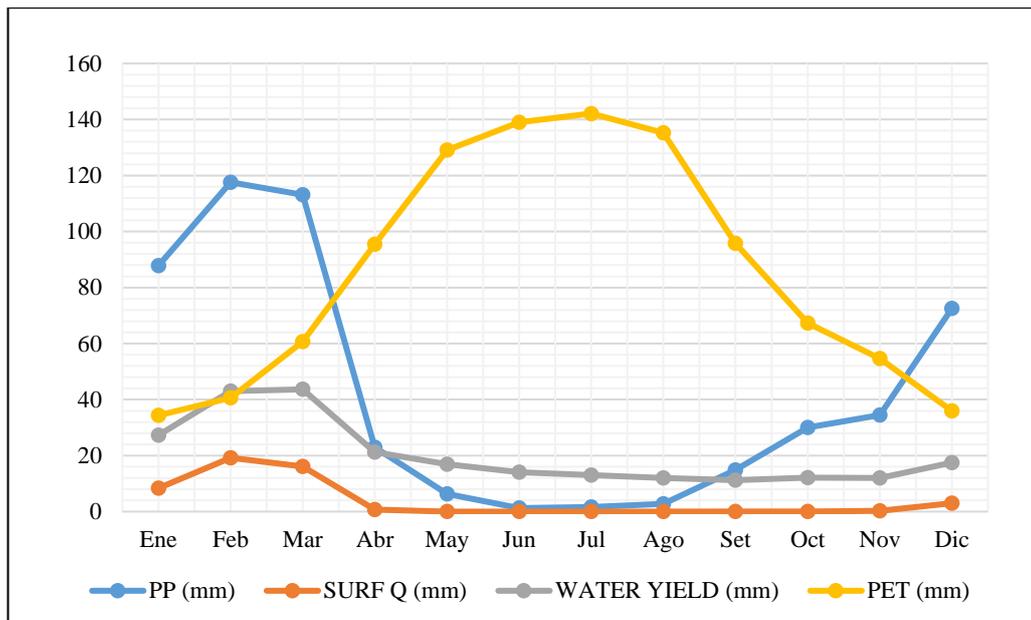


Figura 96: Resultado de las variables simuladas (Salida 6)- cuenca Mchique

4.3.3. Modelamiento hidrológico con el modelo Lutz Scholtz Modificado (LSM)

a. Estimación de Curva Número (CN) promedio anual de las cuencas Anya y Mchique

Para la estimación de la Curva Número (CN) de las cuencas de estudio, se utilizó las capas o *shapefiles* (formato shp.) de suelos, cobertura vegetal, delimitación de las cuencas hasta el punto de aforo y los Modelos de Elevación Digital (DEM). Para el caso del área urbana, se utilizó la Tabla 6 considerándose espacios abiertos en malas condiciones (cubiertas < 50%). En plantaciones forestales, herbazales y matorrales se consideraron condiciones hidrológicas deficientes (Tabla 5). El área agrícola se catalogó como de cultivos no alineados con surcos pequeños y mal definidos (típicos de las zonas altoandinas) en condiciones hidrológicas buenas, porque las áreas agrícolas suelen ubicarse en zonas más planas y en los valles (Tabla 5). La Tabla 110 contiene la asignación de códigos de cobertura vegetal (Landuse=LUvalue) que se le dio, de acuerdo a la exigencia del programa y a la base de datos de Curva Número del SCS de EE.UU.:

Tabla 110: Asignación de Curva Número según cobertura vegetal en Anya y Mchique

LUvalue	Descripción	A	B	C	D
1	Ríos	100	100	100	100
2	Área urbana	69	79	86	89
3	Plantación forestal	45	66	77	83
4	Herbazal y/o matorral	47	67	81	88
5	Área agrícola	63	75	83	87

A continuación, se muestra la Figura 97 que es la Tabla de atributos de la capa conformada por la unión de los *shapefiles* de Suelos y Cobertura Vegetal de la cuenca Anya en donde puede verificarse los campos correspondientes a LUvalue (*Landuse value*), PctA, PctB, PctC, PctD y LUcode que corresponde a los Grupos Hidrológicos del Suelo A, B, C y D. El campo CN se agrega de manera automática al utilizarse la opción Utility, Generate CN Grid.

ID	Shape	Name	GHS	COBERTURA	LUvalue	PctA	PctB	PctC	PctD	LUcode	CN	Area
1	Polygon	AB42	B	Área Agrícola	5	0	100	0	0	5 B	75	3.53028
2	Polygon	AB43	C	Área Urbana	2	0	0	0	100	2 D	89	0.647837
3	Polygon	AB44	C	Área Agrícola	5	0	0	100	0	5 C	83	8.319342
4	Polygon	AB45	C	Herbazal o matorral	4	0	0	100	0	4 C	81	6.80258
5	Polygon	AB46	C	Herbazal o matorral	4	0	0	100	0	4 C	81	0.022271
6	Polygon	AB47	C	Herbazal o matorral	4	0	0	100	0	4 C	81	1.020633
7	Polygon	AB48	C	Plantación Forestal	3	0	0	100	0	3 C	77	0.040585
8	Polygon	AB49	C	Plantación Forestal	3	0	0	100	0	3 C	77	0.23882
9	Polygon	AB50	C	Área Agrícola	5	0	0	100	0	5 C	83	1.002657
10	Polygon	AB51	C	Herbazal o matorral	4	0	0	100	0	4 C	81	0.730144
11	Polygon	AB52	C	Herbazal o matorral	4	0	0	100	0	4 C	81	0.753825
12	Polygon	AB53	C	Herbazal o matorral	4	0	0	100	0	4 C	81	3.285785
13	Polygon	AB54	C	Herbazal o matorral	4	0	0	100	0	4 C	81	1.955271
14	Polygon	AB55	C	Herbazal o matorral	4	0	0	100	0	4 C	81	0.574827
15	Polygon	AB56	C	Plantación Forestal	3	0	0	100	0	3 C	77	4.251821
16	Polygon	AB57	C	Plantación Forestal	3	0	0	100	0	3 C	77	0.321845
17	Polygon	AB58	C	Plantación Forestal	3	0	0	100	0	3 C	77	0.620587
18	Polygon	AB59	B	Herbazal o matorral	4	0	100	0	0	4 B	67	1.488585
19	Polygon	AB60	C	Área Agrícola	5	0	0	100	0	5 C	83	0.210071
20	Polygon	AB61	B	Herbazal o matorral	4	0	100	0	0	4 B	67	5.781688
21	Polygon	AB62	B	Herbazal o matorral	4	0	100	0	0	4 B	67	1.163853
22	Polygon	AB63	B	Herbazal o matorral	4	0	100	0	0	4 B	67	3.147661
23	Polygon	AB64	B	Herbazal o matorral	4	0	100	0	0	4 B	67	6.87475
24	Polygon	AB65	B	Plantación Forestal	3	0	100	0	0	3 B	66	0.073751
25	Polygon	AB66	B	Plantación Forestal	3	0	100	0	0	3 B	66	0.241841

Figura 97: Tabla de atributos de resultado de CN Grid en el Hec Geo Hms

En el caso de la cuenca Anya el valor de CN ponderada resultó igual a $CN = 3184.51 / 41.71 = 76.35$ lo que se redondeó a 76. La Tabla 111 contiene las variables para calcular la CN.

Tabla 111: Atributos tabulares de ArcGIS, cuenca Anya- cálculo de CN ponderada

Cobertura	CN	Área (km²)	CN x área
Área Agrícola	75	3.58	268.23
Área Urbana	89	0.65	57.65
Área Agrícola	83	8.32	690.17
Herbazal o matorral	81	0.00	0.21
Herbazal o matorral	81	0.02	1.80
Herbazal o matorral	81	1.83	148.31
Herbazal o matorral	81	0.85	68.81
Plantación forestal	77	0.0006	0.05
Plantación forestal	77	0.24	18.17
Área Agrícola	83	1.08	89.97
Herbazal o matorral	81	0.73	59.15
Herbazal o matorral	81	0.75	60.82
Herbazal o matorral	81	3.27	264.53
Herbazal o matorral	81	1.96	158.38
Herbazal o matorral	81	0.37	30.37
Plantación forestal	77	4.25	327.38
Plantación forestal	77	0.32	24.79
Plantación forestal	77	0.68	52.56
Herbazal o matorral	67	1.49	99.83
Área Agrícola	83	0.32	26.39
Herbazal o matorral	67	5.76	386.05
Herbazal o matorral	67	1.10	73.96
Herbazal o matorral	67	3.75	251.11
Herbazal o matorral	67	0.07	5.01
Plantación forestal	66	0.07	4.87
Plantación forestal	66	0.24	15.95
Suma		41.71	3184.51

La Figura 98 contiene el Mapa de Curva Número CN en la cuenca Anya donde los valores de CN varían entre 66 y 89 correspondiéndole el mayor valor a la zona urbana de la cuenca. La zona alta de la cuenca tiene valores menores de CN donde la cobertura vegetal es pajonal y donde el suelo tiene una predominancia de textura franca. La zona de predominancia de cultivos tiene un valor de CN intermedio.

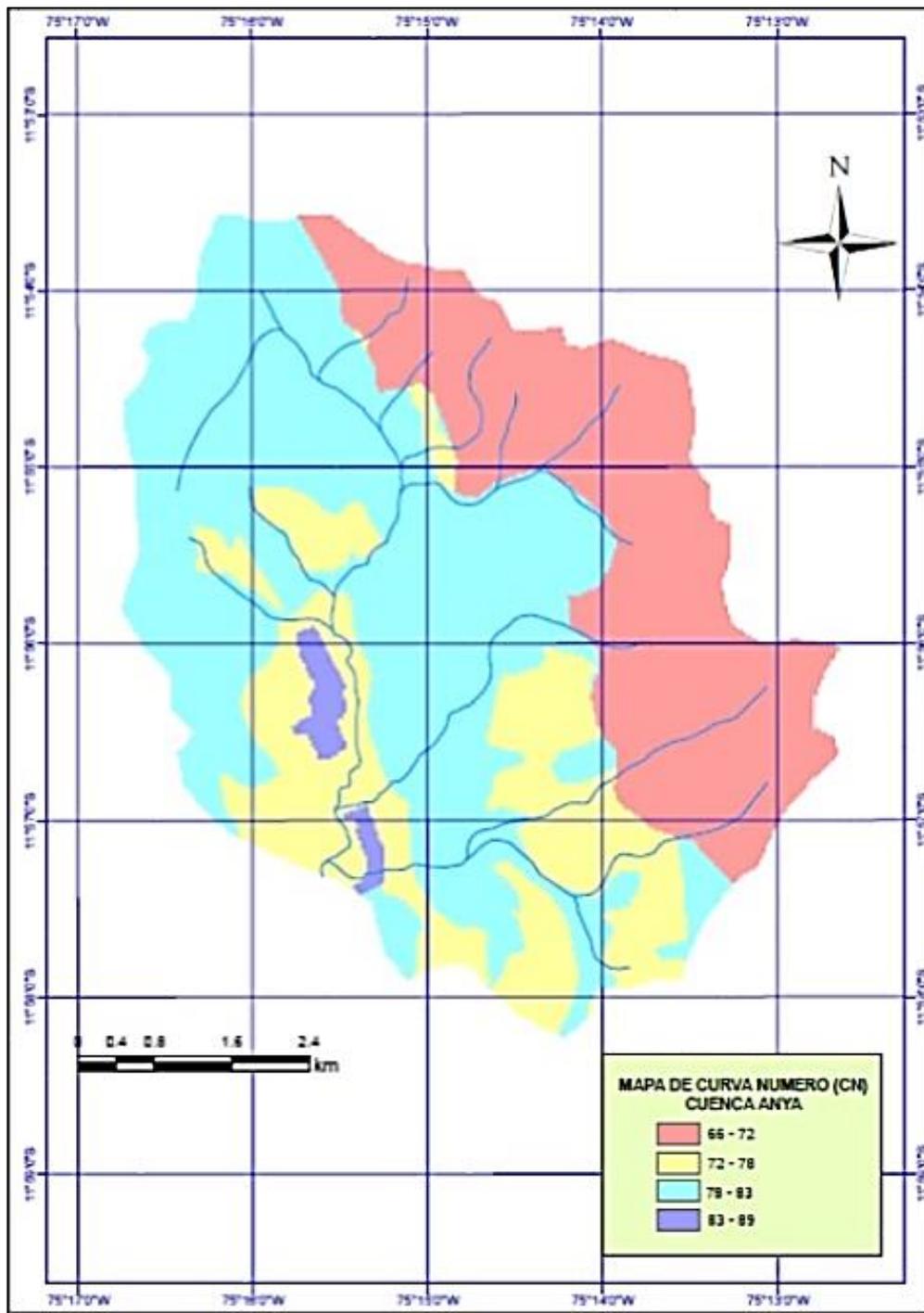


Figura 98: Mapa de CN de la cuenca Anya generado con Hec Geo Hms y Arc Gis ($CN_{pond.}=76$)

En el caso de la cuenca Mchique, la CN ponderada resultó igual a $CN=2018.74/25.62 = 78.8$, redondeándose a 79. La Tabla 112 contiene las variables utilizadas para calcular CN.

Tabla 112: Atributos tabulares de Arc Gis, cuenca Mchique - cálculo de CN ponderada

Cobertura	CN	Área (km ²)	CN x Área
Área agrícola	75	1.44	108.06
Herbazal y/o matorral	67	1.02	68.48
Herbazal y/o matorral	67	0.83	55.88
Área agrícola	83	11.60	962.89
Herbazal y/o matorral	81	0.84	68.32
Herbazal y/o matorral	81	0.36	29.09
Herbazal y/o matorral	81	2.10	169.99
Herbazal y/o matorral	81	1.22	98.92
Plantación forestal	77	3.44	264.71
Área agrícola	75	0.93	69.75
Herbazal y/o matorral	67	1.81	120.94
Plantación forestal	66	0.03	1.73
Suma		25.62	2018.74

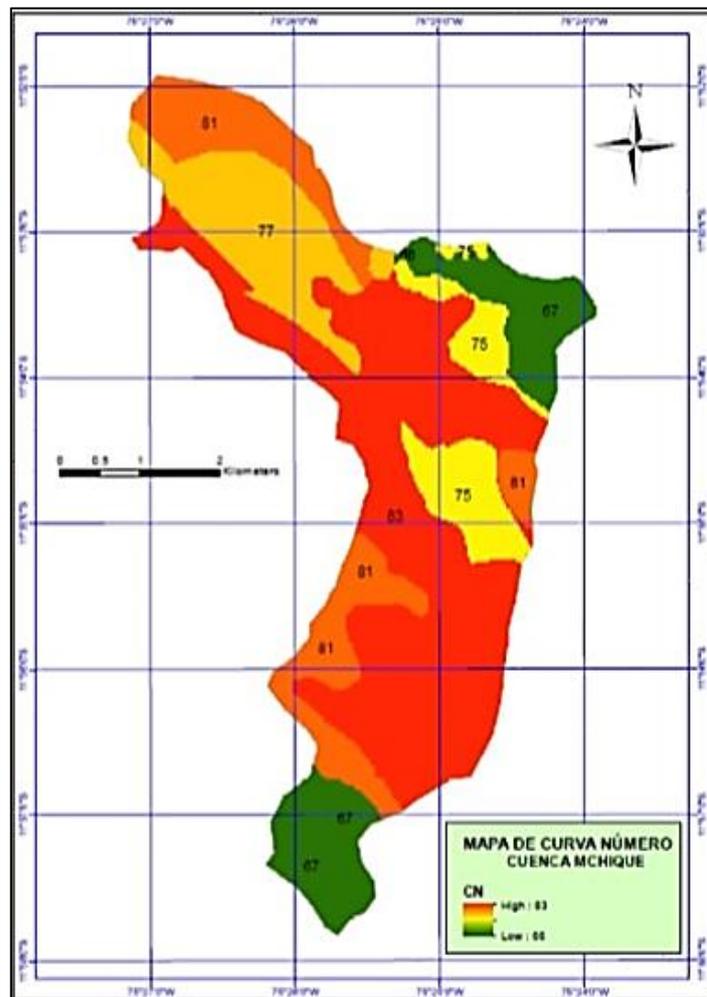


Figura 99: Mapa de CN de la cuenca Anya generado con Hec Geo Hms y Arc Gis (CN_{pond.}=79)

La Figura 99 muestra el Mapa de Curva Número (CN) en la cuenca Mchique donde los valores de CN varían entre 66 y 83 correspondiéndole el mayor valor a la cuenca media coincidente con el relieve más abrupto. La zona más alta de la cuenca tiene valores menores donde existe una altiplanicie.

El uso del número de curva es importante porque existe una tendencia creciente a dirigir la atención hacia el número de curva, el cual se interpreta como un descriptor geográfico general de las condiciones del territorio que representa el potencial de escorrentía que tiene una superficie. Asimismo, los sistemas de información geográfica han demostrado ser herramientas de gran utilidad en la estimación del número de curva en una cuenca hidrográfica (Díaz & Mercado 2017). El número de curva es un método ampliamente utilizado en distintos modelos hidrológicos como SWAT y HEC HMS (Cano *et al.* 2014) porque es fácil de aplicar en condiciones de escasez de datos y como una forma sencilla de determinar la escorrentía (Mishra 2004).

b. Caracterización de la humedad promedio de los suelos de Anya y Mchique

Se sabe que la humedad del suelo es un elemento determinante en la estimación de la partición de la precipitación en infiltración y escurrimiento; la partición de la energía disponible en calor latente y calor sensible, el drenaje del agua al acuífero o sobre la superficie y el desarrollo de la vegetación, la respiración del suelo y la productividad biológica (Bautista *et al.* 2013). Los datos de humedad del suelo (Tabla 113) utilizados en esta investigación, fueron consolidados mensualmente por Camones (2015), los cuales fueron obtenidos con un equipo Field Scout TDR-300 automático, cuya profundidad de muestreo fue de 10 cm., muestreos realizados en puntos representativos de cada cuenca (Los datos por cada punto representativo de la cuenca y por mes de muestreo, se encuentran en el anexo).

Tabla 113: Humedad promedio mensual de las cuencas Anya y Mchique

(Profundidad de muestreo = 10 cm)

Año	Mes	Humedad volumétrica (%)	
		C. Anya	C. Mchique
2013	Dic	28.4	36.0
	Ene	37.5	49.9
	Feb	35.4	25.2
	Mar	35.2	35.4
	Abr	36.0	23.8
	May	27.8	25.9
2014	Jun	14.1	7.8
	Jul	8.5	7.8
	Ago	8.8	7.3
	Set	10.3	9.9
	Oct	13.8	12.2
	Nov	27.3	18.3
	Dic	25.0	35.9

FUENTE: Camones, 2015.

Se realizó la corrección de humedad, considerando que los datos obtenidos en el campo con el sensor TDR – 300 no fueron calibrados. Las diferencias entre las lecturas de los sensores de humedad y los valores gravimétricos están asociados al contacto suelo - sonda y a las condiciones del sitio. Los valores de las curvas de humedad tienden a estabilizarse a través del tiempo. Sin embargo, las condiciones de pedregosidad, porosidad y bajo porcentaje de retención de humedad del suelo, son una limitante importante a la hora de calibrar estos equipos en campo (Usuga & Pauwels 2008).

En nuestro caso, se utilizó un factor definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Factor de Humedad (FH)} = \frac{1}{100 - H_v(\%)} \times 100 \quad \text{Ec. 131}$$

Donde H_v es la humedad volumétrica del suelo (%).

c. Caracterización de la humedad antecedente de los suelos de Anya y Mchique

Mensualmente se determinaron tres condiciones de humedad en el suelo: seco (condición I), intermedio (condición II) y húmedo (condición III) verificando la

humedad según los intervalos considerados en la Tabla 36 que están en función de la lámina de precipitación en los 5 días anteriores y el período de crecimiento de las plantas.

Por ejemplo, en la cuenca Anya el 01 de enero de 2014 debió verse la humedad promedio del mes de diciembre de 2013, en este caso es 28.4 mm, que según la Tabla 36, para plantas en período de crecimiento, es menor de 35 mm, lo cual permitió calificar a la humedad previa del suelo en el mes de enero como Seco (I). Se utilizó el mismo análisis con los demás meses del año, logrando caracterizarlos de acuerdo a su condición antecedente de humedad (Tabla 114).

Tabla 114: Condición antecedente de humedad mensual en las cuencas de estudio

Cuenca	Año	Mes	Humedad inicial (mm)	Factor de corrección	Humedad final (mm)	Campaña agrícola	Período vegetativo	Condición antecedente de humedad
Anya	2013	Dic	28.4	1.4	40	Campaña grande	P. Crecimiento	I
		Ene	37.5	1.6	60		P. Crecimiento	II
		Feb	35.4	1.5	55	Campaña grande	P. Crecimiento	III
		Mar	35.2	1.5	54		P. Crecimiento	III
		Abr	36.0	1.6	56		P. Latencia	III
	2014	May	27.8	1.4	38		P. Crecimiento	III
		Jun	14.1	1.2	16	Campaña chica	P. Crecimiento	I
		Jul	8.5	1.1	9		P. Crecimiento	I
		Ago	8.8	1.1	10		P. Crecimiento	I
		Set	10.3	1.1	11		P. Crecimiento	I
		Oct	13.8	1.2	16		P. Latencia	II
		Nov	27.3	1.4	38	Campaña grande	P. Crecimiento	II
Dic	25.0	1.3	33		P. Crecimiento	II		
Mchique	2013	Dic	36.0	1.6	56	Campaña grande	P. Crecimiento	I
		Ene	49.9	2.0	100		P. Crecimiento	II
		Feb	25.2	1.3	34	Campaña grande	P. Crecimiento	III
		Mar	35.4	1.5	55		P. Crecimiento	I
		Abr	23.8	1.3	31		P. Latencia	III
		May	25.9	1.3	35		P. Crecimiento	I
		Jun	7.8	1.1	8	Campaña chica	P. Crecimiento	I
		Jul	7.8	1.1	8		P. Crecimiento	I
		Ago	7.3	1.1	8		P. Crecimiento	I
		Set	9.9	1.1	11		P. Crecimiento	I
		Oct	12.2	1.1	14		P. Latencia	I
		Nov	18.3	1.2	22	Campaña grande	P. Crecimiento	II
		Dic	35.9	1.6	56		P. Crecimiento	I

El contenido de humedad del suelo es una variable determinante al relacionar procesos atmosféricos y superficiales que se refiere a la cantidad de agua almacenada en la zona no-saturada, donde el suelo está formado por diferentes capas u horizontes (perfil de suelo) cada uno con diferentes propiedades. Su variabilidad espacio temporal está determinada principalmente por las características físicas del suelo, tipo de vegetación y condiciones climáticas de la región (Torres *et al.* 2014). La heterogeneidad del suelo influye ampliamente en el contenido de humedad, dificultando la precisa determinación de este parámetro en estudios con fines hidrológicos y ecológicos que requieren de mediciones continuas y representativas para escalas intermedias (~1 km) (Bautista *et al.* 2013).

La teoría del Número de Curva se aplica, considerando tres variables relevantes: (i) la precipitación que corresponde a valor de la cantidad de lluvia estimada en una cuenca de interés, (ii) la humedad anterior, concepto que se identifica con la cantidad de lluvia acumulada antes de ocurrir la lluvia considerada para la cual se establece un período que puede oscilar entre 5 a 30 días, y (iii) el complejo de suelo vegetación que asocia a la evaluación de la escorrentía directa, el uso del suelo y la cobertura vegetal (Corredor y Peñaranda 2012). En el caso de esta investigación, se utilizó la escala mensual, ya que los modelos utilizados tienen como base la ecuación del balance hídrico con fines de planificación.

En este aspecto, sería complementario conocer cuál es el comportamiento de la humedad del suelo y de la CN, frente a los eventos de lluvia, lo cual implicaría realizar mediciones de humedad del suelo a diferentes profundidades (entre 5 y 75 cm de profundidad), porque como lo reportó Tenelanda (2018), la humedad del suelo varía de acuerdo con el estado de humedad previa y la posición topográfica analizada. Es decir, investigaciones en diversos ecosistemas han demostrado que en diferentes posiciones de la ladera existe variación de la humedad del suelo y su respuesta a la lluvia, que a su vez se desencadenan por la cantidad, intensidad de la lluvia y las condiciones antecedentes de humedad. Este mismo autor destaca los reportes de Sarkar *et al.* (2015) en laderas subtropicales húmedas de pradera, donde se demostró que, durante condiciones secas de humedad antecedente, los eventos de precipitación menores a 35 mm no generan escorrentía superficial, la cual es común durante eventos

en los cuales el volumen precipitado excede los 28 mm durante condiciones altas de humedad antecedente.

d. Estimación del coeficiente de agotamiento (a)

Para el cálculo del coeficiente de agotamiento a ser usado en el modelo Lutz Scholtz Modificado, se utilizaron los datos de caudales registrados en las cuencas Anya y Mchique. A través de la ecuación 126 se despejó el coeficiente de agotamiento “a” que permitió encontrar el coeficiente de agotamiento real de las cuencas de estudio a través de la siguiente relación:

$$a = \frac{\ln \frac{Q_t}{Q_0}}{t} \quad \text{Ec. 132}$$

Donde Q_t es la descarga en el tiempo t (m^3/s), Q_0 es la descarga inicial de la curva de agotamiento (m^3/s) y \ln es el logaritmo neperiano.

En la cuenca Anya se utilizaron los datos de caudales medios diarios comprendidos entre el 04 de abril y el 13 de setiembre de 2014 que totalizaron 163 días ($t = 1, 2, \dots, 163$), el valor de Q_t varía cada día y el valor de $Q_0 = 1.86 m^3/s$ (cte). El cálculo a detalle del coeficiente de agotamiento se muestra en el anexo respectivo. La Figura 100 muestra la porción de curva de recesión utilizada para el cálculo del coeficiente de agotamiento de la cuenca que es el promedio de todos los valores obtenidos y que da como resultado “a” igual a 0.011036.

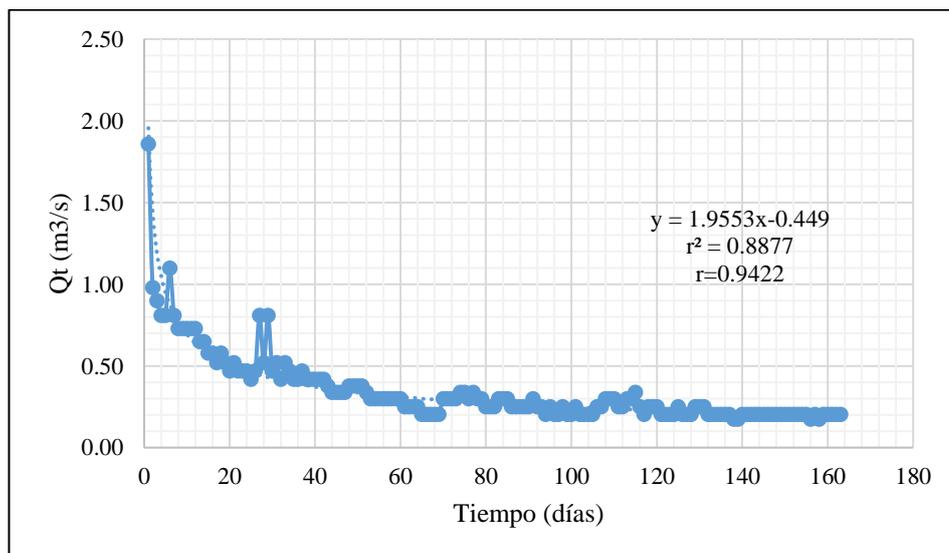


Figura 100: Curva de recesión de la cuenca Anya utilizada en el cálculo de “a”

Para el caso de la cuenca Mchique, se utilizaron los datos de caudales medios diarios comprendidos entre el 05 de marzo y el 08 de junio de 2014 que totalizaron 96 días ($t = 1, 2, \dots, 96$), el valor de Q_t varía cada día y el valor de $Q_0 = 0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ (cte). El cálculo a detalle del coeficiente de agotamiento se muestra en el anexo respectivo. La Figura 101 muestra la porción de curva de recesión utilizada para el cálculo del coeficiente de agotamiento de la cuenca Mchique que es el promedio de todos los valores obtenidos y que da como resultado un coeficiente de agotamiento “a” igual a 0.00218, que significa un agotamiento mucho menor que en la cuenca Anya.

Uno de los desafíos de la modelación hidrología es obtener resultados que sean coherentes a las características internas de los procesos de la cuenca en estudio. Esta perspectiva ha sido ampliamente utilizada en la modelación para aclarar varios aspectos del comportamiento del sistema que no son muy claros, por ejemplo, la respuesta de la cuenca a las propiedades del suelo (Tenelanda *et al.* 2018). En nuestro caso, debido a la reducida capacidad de almacenamiento de la cuenca Anya, la producción del caudal es superficial, a diferencia de la cuenca Mchique que, por las características de los suelos tiene una mayor producción de caudal subsuperficial, lo cual se demuestra en la suave pendiente de su curva de recesión.

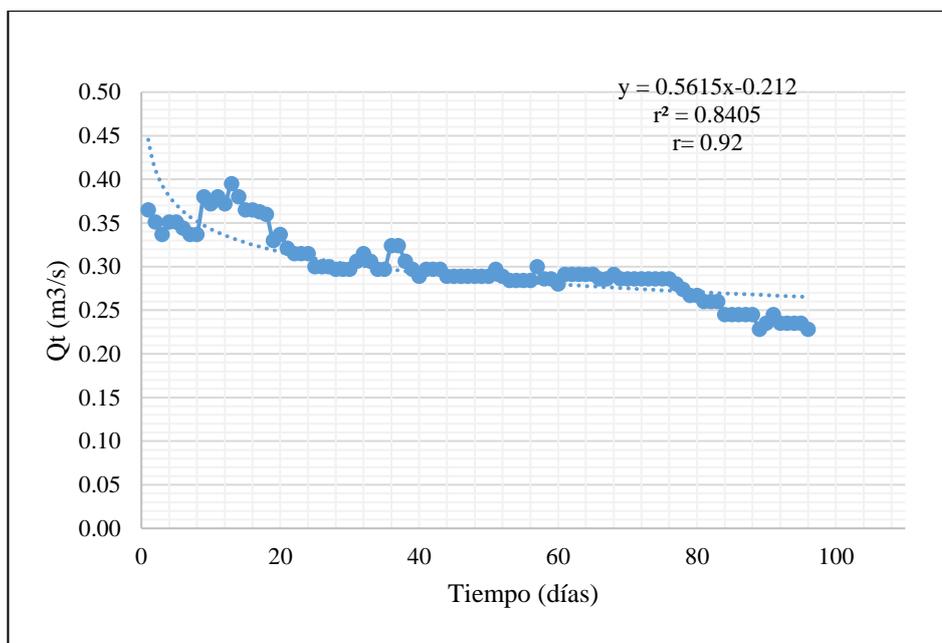


Figura 101: Curva de recesión de la cuenca Mchique utilizada en el cálculo de “a”

La Tabla 115 contiene el resumen de las características generales de las cuencas de estudio, donde es posible diferenciar el área, el coeficiente de agotamiento real y la capacidad de retención de ambas cuencas. Se verifica que los coeficientes de agotamiento reales de las cuencas de estudio, son mucho menores que los valores estimados a través de las fórmulas empíricas en base al área de la cuenca, sugeridos por el Proyecto Meriss II (1980).

Tabla 115: Características generales de las cuencas Anya y Mchique- modelo LSM

Descripción	Und	C. Anya	C. Mchique
Area de la cuenca Anya hasta el punto de aforo: A	km ²	41.7	25.6
Altitud media de la cuenca: H	msnm	3700	3831.4
Pendiente media de la cuenca: Pm	m/m	0.209	0.158
Precipitación total anual: P	mm	740	730
Curva Número Ponderada: CN	Adim.	76	79
Coeficiente de agotamiento: a (días)	Adim.	0.01104	0.00218
Relación de caudales (30 días): b_0^j	Adim.	0.7181	0.941
Area de acuíferos potenciales ($S \leq 12$)	km ²	11.3	7.3
Area de lagunas y bofedales	km ²	0.01	0.06
Contribución mensual del almacenamiento de la cuenca	mm/año	50	80
Suministro mensual al almacenamiento de la cuenca	mm/año	50	80

e. Simulación de caudales mensuales en el río Anya con el modelo LSM

Se realizaron las correcciones al valor de abstracciones iniciales (que fue calculado en función de la CN), considerando la humedad antecedente desde el primer día de un mes, mirando los 5 días anteriores. Para la cuenca Anya, con el valor de CN ponderada calculada igual a 76, se calculó la abstracción máxima (S) y la abstracción inicial (I_a) igual al 20% de S (correspondiente a la condición de humedad II), resultando $S = 80.2$ mm e $I_a = 20\% (80.2) = 16.04$ mm. Para el caso de I_a en condición seca (I) resultó $I_{a(I)} = 16.04 \times 2.281 = 36.6$ mm y para el caso de I_a en condición húmeda (III) resultó $I_{a(III)} = 16.04 \times 0.427 = 6.8$ mm. La Tabla 116 muestra el consolidado de Abstracciones Máximas y Abstracciones Iniciales calculados para condición antecedente de humedad II, calculadas a partir del valor de CN, $CN_{Anya} = 76$ y $CN_{Mchique} = 79$.

Tabla 116: Abstracciones máximas e iniciales según CN ambas cuencas

CN	S (Abs. Máx.) en mm	Ia (20% S) en mm
70	108.86	21.77
71	103.75	20.75
72	98.78	19.76
73	93.95	18.79
74	89.24	17.85
75	84.67	16.93
76	80.21	16.04
77	75.87	15.17
78	71.64	14.33
79	67.52	13.50
80	63.50	12.70

Los cálculos de la simulación de caudales en el río Anya con el modelo de Lutz Scholtz Modificado, se consolidó en la Tabla 117.

Tabla 117: Simulación de caudales mensuales, río Anya - modelo Lutz Scholtz Modificado

Condición de humedad previa en el suelo	Mes	Nº días del mes	P total mm/mes	Ia mm	PE mm/mes	Qc (+) b ₀ ^j mm/mes	Qs (-) (%) mm/mes	Q simulado mm/mes	Q simulado m³/s	Q observado mm/mes	Q observado m³/s	
II	Ene	31	122.5	16.0	60.7		0.100	5.0	55.7	0.87	60.6	0.94
III	Feb	28	132.8	6.8	99.0		0.600	30.0	69.0	1.19	42.0	0.72
III	Mar	31	117.9	6.8	84.9		0.100	5.0	79.9	1.24	73.3	1.14
III	Abr	30	54.5	6.8	27.7	0.718	16.3		44.1	0.71	42.5	0.68
III	May	31	14.8	6.8	1.5	0.516	11.7		13.2	0.21	26.0	0.40
I	Jun	30	5.6	36.6	6.3	0.370	8.4		14.8	0.24	16.9	0.27
I	Jul	31	4.0	36.6	7.1	0.266	6.0		13.1	0.20	16.0	0.25
I	Ago	31	11.4	36.6	4.0	0.191	4.3		8.4	0.13	13.5	0.21
I	Set	30	33.0	36.6	0.1	0.137	3.1		3.2	0.05	18.6	0.30
II	Oct	31	63.8	16.0	17.9		0.000	0.0	17.9	0.28	18.1	0.28
II	Nov	30	71.0	16.0	22.4		0.000	0.0	22.4	0.36	23.4	0.38
II	Dic	31	110.4	16.0	51.0		0.200	10.0	41.0	0.64	34.3	0.53
MAX.			132.8		99.0					1.24	73.3	1.14
MIN.			4.0		0.1					0.05	13.5	0.21
PROM.			61.8		31.9					0.51	32.1	0.51
SUMA			741.8		382.7	2.198	50.0	1.000	50.0	382.7		385.0

La precipitación efectiva (PE) total anual en la cuenca Anya es igual a 382.7 mm, la cual se obtuvo luego de calcular la CN = 76 y con este valor se calculó la abstracción máxima y abstracción inicial, además de asignar humedades antecedentes

mensualizadas en base a los datos reales de la humedad muestreada en el suelo y luego calcular las abstracciones iniciales para condiciones de humedad del suelo secas y húmedas, según mes del año. Asimismo (Tabla 118), podemos ver que el caudal promedio anual generado con el modelo Lutz Scholtz Modificado es igual al caudal promedio anual observado, así $Q_{\text{prom. Sim.}} = Q_{\text{prom. Obs.}} = 0.51 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 118: Cálculo de errores (Q_{sim} vs. Q_{obs}) - cuenca Anya

Mes	Qobs	Qsim	Qsim-Qobs	Errores (m ³ /s)		
				(Qsim-Qobs) ²	Qobs-Qprom	(Qobs-Qprom) ²
Ene	0.94	0.87	-0.075	0.006	0.433	0.188
Feb	0.72	1.19	0.467	0.218	0.213	0.046
Mar	1.14	1.24	0.103	0.011	0.631	0.399
Abr	0.68	0.71	0.025	0.001	0.175	0.030
May	0.40	0.21	-0.198	0.039	-0.106	0.011
Jun	0.27	0.24	-0.034	0.001	-0.238	0.057
Jul	0.25	0.20	-0.044	0.002	-0.261	0.068
Ago	0.21	0.13	-0.080	0.006	-0.299	0.090
Set	0.30	0.05	-0.247	0.061	-0.211	0.045
Oct	0.28	0.28	-0.003	0.000	-0.229	0.052
Nov	0.38	0.36	-0.017	0.000	-0.133	0.018
Dic	0.53	0.64	0.105	0.011	0.024	0.001
Sumatoria	6.12	6.12	0.000	0.356	0.000	1.003
Promedio	0.51	0.51	0.000	0.030	0.000	0.084
Desv.	0.30	0.41				
C.V.	0.59	0.81				

Para la ejecución del modelo Lutz Scholtz Modificado, se ha rectificado el porcentaje mensual de suministro al reservorio cuenca Q_{s_i} en las cuencas Anya y Mchique, (los cuales se utilizan en la temporada de lluvias). La Tabla 119 muestra el consolidado de porcentajes de contribución al reservorio cuenca para la región Junín.

Tabla 119: Almacenamiento hídrico durante la época de lluvias en las cuencas Anya y Mchique

Ene	Feb	Mar	Oct	Nov	Dic	Sum.
10%	60%	10%	0%	0%	20%	100%

f. Estadísticos de bondad de ajuste del modelo Lutz Scholtz Modificado - Anya

Se calcularon los indicadores de eficiencia de modelos cuyo resumen se presenta en la Tabla 120. El criterio de eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE) resultó igual a $NSE = 1$

– $(0.36 / 1) = 0.56$, estando comprendido entre $0.50 < NSE \leq 0.65$ y que según la Tabla 21 significa ajuste Satisfactorio del modelo. El porcentaje de la variación calculado resultó igual a $PBIAS = 0.0\%$ el cual es Excelente ($< \pm 10\%$) y el análisis de correlación entre Q_{Sim} y Q_{Obs} con el modelo LSM, permite establecer que la relación de dependencia es Satisfactoria con un “r” igual a 0.92, es decir que los caudales observados han sido simulados adecuadamente por el modelo y los indicadores de bondad de ajuste han mejorado notablemente con respecto al modelo Lutz Scholtz tradicional. Se ha graficado el histograma de caudales simulados y observados en el año base (Figura 102).

Tabla 120: Bondad de ajuste del modelo Lutz Scholtz Modificado – cuenca Anya

Indicador	Valor calculado	Calificación de rendimiento
NSE	0.64	Satisfactorio
PBIAS	0.00%	Excelente
r	0.92	Satisfactorio

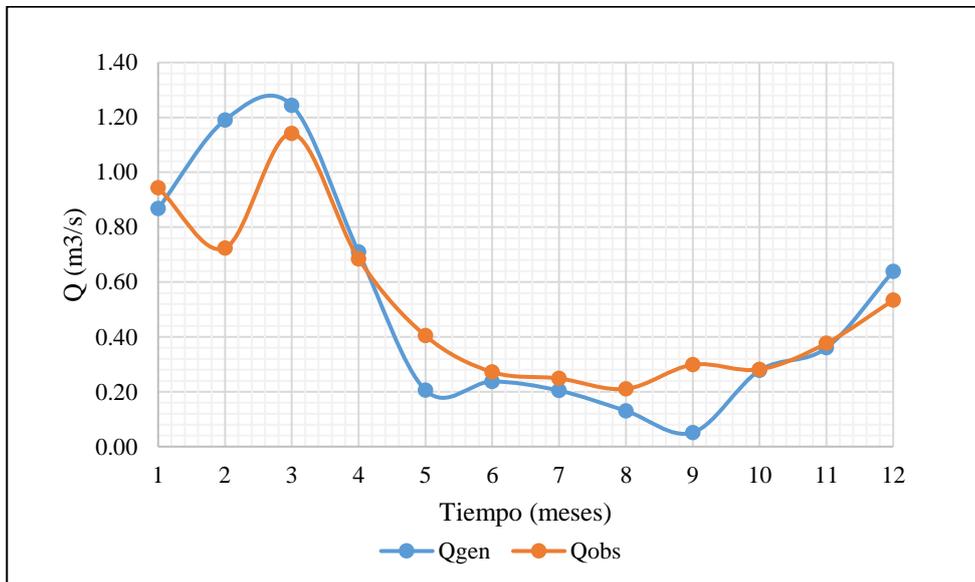


Figura 102: Hidrograma de Q_{obs} y Q_{sim} con el modelo Lutz Scholtz Modificado - Anya

Del histograma se observa que el modelo representa la variación estacional del río Anya (su comportamiento en época húmeda y seca), manteniendo la igualdad estadística del caudal promedio en el año.

g. Ecuación de generación de escurrimientos (Q_t) del modelo Lutz Scholtz Modificado -cuenca Anya

La regresión múltiple entre Q_t (variable dependiente Y), Q_{t-1} (variable independiente X_1) y PE_t (variable independiente X_2) utilizando la opción Datos (análisis de datos) del Excel, permitió obtener la siguiente ecuación:

$$Q_t = 4.0107 + 0.2874(Q_{t-1}) + 0.5868(PE_t) + 0.8305(z)$$

Tabla 121: Parámetros de generación de escurrimientos para períodos extendidos con LSM

Mes	Q_t (mm)	Q_{t-1} (mm)	PE_t (mm)
Ene	58.30	31.08	63.3
Feb	61.87	58.30	91.9
Mar	86.02	61.87	91.0
Abr	65.24	86.02	48.9
May	21.68	65.24	10.0
Jun	11.53	21.68	3.1
Jul	12.46	11.53	6.4
Ago	11.41	12.46	8.3
Set	7.74	11.41	3.4
Oct	0.47	7.74	0.5
Nov	14.25	0.47	14.3
Dic	31.08	14.25	41.1
Suma	382.05	382.05	382.05

Los resultados de la regresión lineal múltiple con dos variables independientes dan como resultado los siguientes estadísticos (Tabla 122):

Tabla 122: Estadísticos de la regresión modelo LSM – Cuenca Anya

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple r	0.986576
Coefficiente de determinación r^2	0.973332
r^2 ajustado	0.967407
Error típico	4.600317
Observaciones	12

En el anexo 7 se han colocado 10 años de series de caudales generados con el modelo LSM en la cuenca Anya, las cuales se promediaron para luego compararlas con el

promedio de 10 series de caudales generados con el modelo LS, obteniéndose la Tabla 123:

Tabla 123: Promedio de 10 series generadas (mm), modelos LS y LSM- cuenca Anya

Mes	Mod_LSM	Mod_LS	Obs
Ene	51.69	58.26	60.56
Feb	78.60	70.25	41.95
Mar	74.11	65.27	73.30
Abr	43.80	33.81	42.53
May	18.03	17.75	25.96
Jun	11.95	8.83	16.90
Jul	12.69	5.61	15.96
Ago	10.53	5.10	13.52
Set	6.85	7.22	18.57
Oct	15.76	14.52	18.06
Nov	22.76	20.72	23.42
Dic	40.80	41.38	34.27
Suma	387.6	348.7	385.0

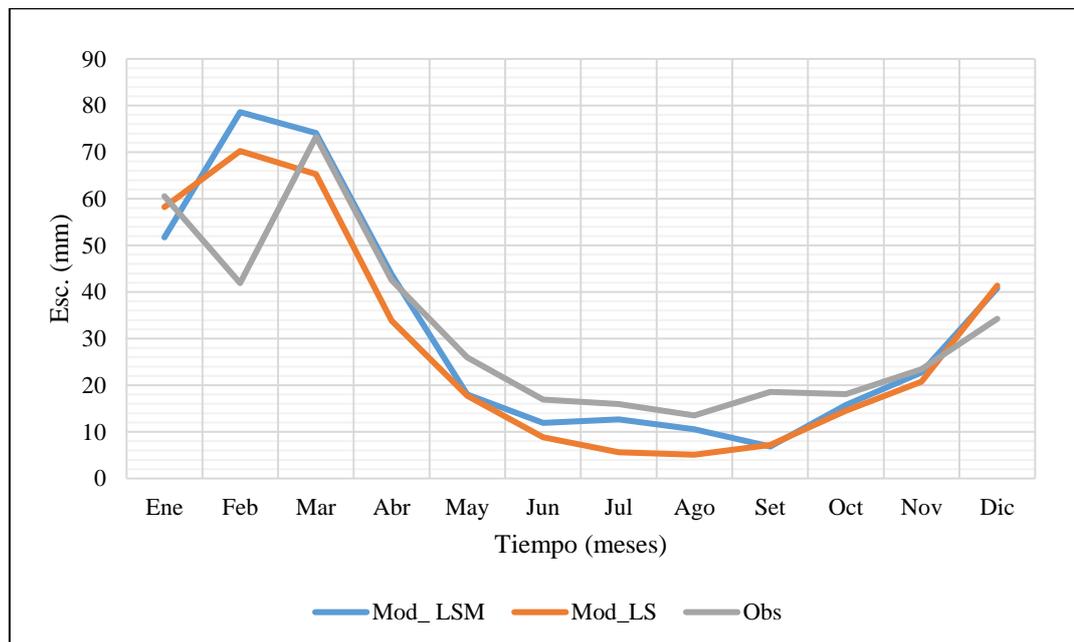


Figura 103: Histograma comparativo de modelos LS, LSM y Obs. - cuenca Anya

El histograma muestra que los caudales simulados con ambos modelos (LS y LSM) tienen comportamientos marcadamente estacionales, sin embargo, los caudales simulados en estiaje son un poco menores en ambos modelos (Figura 103).

h. Simulación de caudales mensuales en el río Mchique con el modelo LSM

En Mchique, a partir de la Curva Número igual a 79, se calculó la máxima abstracción (S) y la abstracción inicial (I_a), resultando $S = 67.5$ mm e $I_a = 20\% (67.5) = 13.5$ mm estableciéndose las condiciones de humedad antecedentes para cada mes dentro del año según la Tabla 121, de la siguiente manera: para el caso de I_a en condición seca (I) resultó $I_{a(I)} = 13.5 \times 2.281 = 30.8$ mm y para el caso de I_a en condición húmeda (III) resultó $I_{a(III)} = 13.5 \times 0.427 = 5.8$ mm. Los cálculos de la primera simulación de caudales en el río Mchique se consolidó en la Tabla 124:

Tabla 124: Simulación caudales mensuales, río Mchique - modelo L. Scholtz Modificado

Condición de humedad previa en el suelo	Mes	Nº días del mes	P total mm/mes	Ia mm	PE mm/mes	Qc (+)		Qs (-)		Q simulado		Q observado	
						b_0^j	mm/mes	(%)	mm/mes	mm/mes	m ³ /s	mm/mes	m ³ /s
II	Ene	31	114.6	13.5	60.6			0.100	8.0	52.6	0.50	29.3	0.28
III	Feb	28	128.8	5.8	99.7			0.600	48.0	51.7	0.55	27.4	0.29
II	Mar	31	111.7	13.5	58.1			0.100	8.0	50.1	0.48	34.5	0.33
III	Abr	30	53.6	5.8	29.8	0.941	15.4			45.3	0.45	30.4	0.30
I	May	31	13.5	30.8	2.2	0.885	14.5			16.7	0.16	29.3	0.28
I	Jun	30	6.2	30.8	4.7	0.833	13.7			18.4	0.18	25.3	0.25
I	Jul	31	3.6	30.8	5.8	0.784	12.9			18.7	0.18	25.1	0.24
I	Ago	31	12.2	30.8	2.6	0.737	12.1			14.7	0.14	23.0	0.22
I	Set	30	35.4	30.8	0.1	0.694	11.4			11.5	0.11	22.3	0.22
I	Oct	31	65.4	30.8	6.3			0.000	0.0	6.3	0.06	24.1	0.23
II	Nov	30	69.7	13.5	25.5			0.000	0.0	25.5	0.25	23.3	0.23
I	Dic	31	114.2	30.8	29.3			0.200	16.0	13.3	0.13	24.1	0.23
MAX.			128.8		99.7					52.6	0.55	34.5	0.33
MIN.			3.6		0.1					6.3	0.06	22.3	0.22
PROM.			60.7		27.1					27.1	0.27	26.5	0.26
SUMA			728.9		324.9	4.874	80.0	1.000	80.0	324.9		318.0	

En la cuenca Mchique, se verifica que la precipitación efectiva (PE) es de 324.9 mm que es menor a la escorrentía ocurrida en la cuenca Anya, aún siendo que la CN = 79 que es mayor a la CN = 76 (Anya), esto se explica porque hay un contenido de humedad en el suelo menor con siete meses en condición seca (I) que hace que la abstracción inicial sea mayor y por ende el escurrimiento menor.

A continuación, se puede ver la Tabla 125 en donde se tienen los errores con los cuales se calcularon los indicadores de bondad de ajuste del modelo.

Tabla 125: Cálculo de errores (Q_{sim} vs. Q_{obs}) - cuenca Mchique

Mes	Q_{obs}	Q_{sim}	Errores (m^3/s)			
			$Q_{sim}-Q_{obs}$	$(Q_{sim}-Q_{obs})^2$	$Q_{obs}-Q_{prom}$	$(Q_{obs}-Q_{prom})^2$
Ene	0.28	0.50	0.22	0.05	0.02	0.00
Feb	0.29	0.55	0.26	0.07	0.03	0.00
Mar	0.33	0.48	0.15	0.02	0.07	0.01
Abr	0.30	0.45	0.15	0.02	0.04	0.00
May	0.28	0.16	-0.12	0.01	0.02	0.00
Jun	0.25	0.18	-0.07	0.00	-0.01	0.00
Jul	0.24	0.18	-0.06	0.00	-0.02	0.00
Ago	0.22	0.14	-0.08	0.01	-0.04	0.00
Set	0.22	0.11	-0.11	0.01	-0.04	0.00
Oct	0.23	0.06	-0.17	0.03	-0.03	0.00
Nov	0.23	0.25	0.02	0.00	-0.03	0.00
Dic	0.23	0.13	-0.10	0.01	-0.03	0.00
Sumatoria	3.10	3.19	0.09	0.24	0.00	0.01
Promedio	0.26	0.27	0.01	0.02	0.00	0.00
Desv.Es	0.09	0.20				
CV	0.34	0.74				

i. Calibración del modelo Lutz Scholtz Modificado en la cuenca Mchique

A continuación, se ha considerado colocar las tablas donde se puede desglosar el cálculo de errores para la obtención de los indicadores de bondad de ajuste del modelo (Tabla 126). Además, se han graficado el histograma comparativo entre caudales generados y caudales observados en el año base en la cuenca Mchique.

Tabla 126: Indicadores de bondad de ajuste del modelo – cuenca Mchique

Indicador	Valor	Calificación de rendimiento
NSE	-15.49	Malo
PBIAS	2.92%	Excelente
r	0.82	Satisfactorio

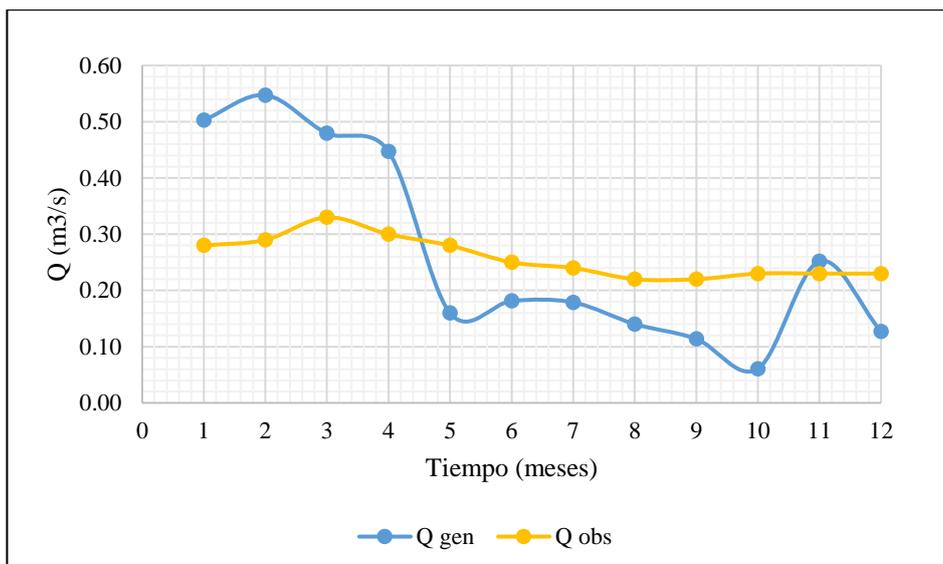


Figura 104: Histograma de Q_{sim} y Q_{obs} con el modelo Lutz Scholtz Modificado – Mchique

De la observación del histograma de la Figura 104 (Q_{obs} y Q_{sim}), podemos ver que el modelo Lutz Scholtz Modificado no representa adecuadamente el comportamiento de los meses dentro del año, notándose grandes diferencias, no obstante, se mantiene la igualdad estadística del caudal promedio anual igual a $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$, razón por la cual no se ha considerado utilizarlo para la generación de caudales extendidos.

4.3.4. Resumen gráfico y estadístico del uso de los modelos LS, SWAT y LSM

A continuación, se coloca un resumen de los caudales observados y caudales simulados con los modelos: Lutz Scholtz, SWAT y Lutz Scholtz Modificado a paso de tiempo mensual en la cuenca Anya con sus estadísticos y diagramas de caja, tal como se muestra en las Figuras 105 y 106, y el resumen de los valores se muestra en la Tabla 127.

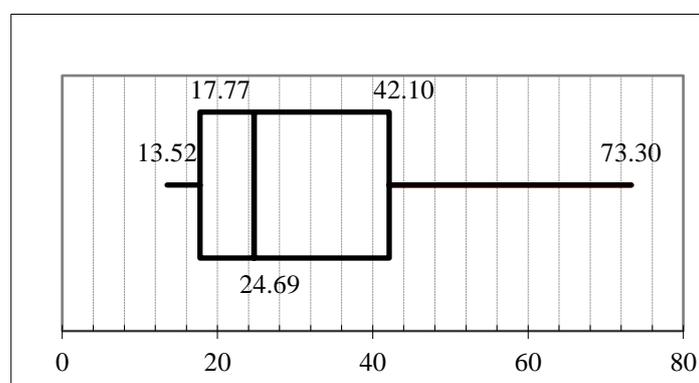


Figura 105: Diagrama de caja para los caudales observados (mm) - cuenca Anya

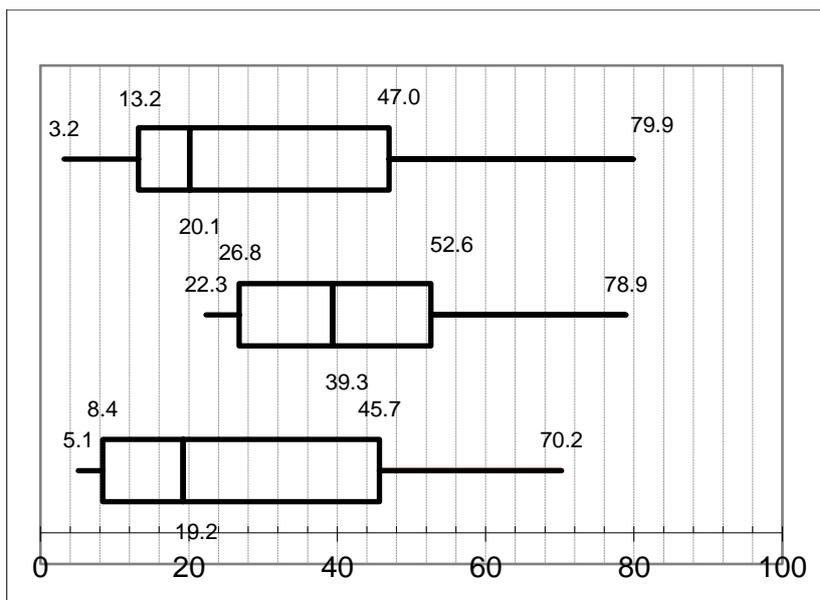


Figura 106: Diagrama de cajas de modelos: LSM, SWAT y LS (arriba - abajo) - Anya

Tabla 127: Resumen de estadísticos obtenidos con los modelos (Q en mm)- Anya

Modelo	Mínimo	Q ₁	Mediana	Q ₃	Máximo
Caudales observados	13.52	17.77	24.69	42.10	73.30
Lutz Scholtz	5.12	8.38	19.24	45.67	70.21
SWAT	22.31	26.76	39.34	52.64	78.90
Lutz Scholtz Modificado	3.19	13.21	20.11	46.99	79.89

En el caso de la cuenca Mchique, se tiene lo siguiente:

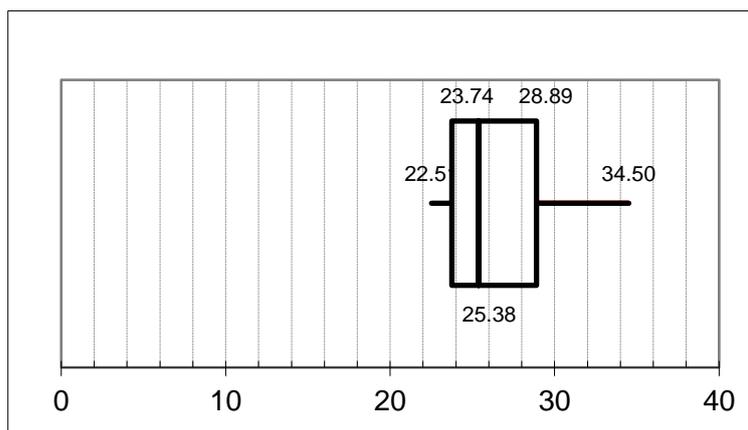


Figura 107: Diagrama de caja para los caudales observados (mm) - cuenca Mchique

Los caudales medios mensuales observados en la cuenca Mchique no tienen una gran amplitud, por lo que, se puede entender que los modelos probados no hayan podido

reproducir adecuadamente los caudales, como se muestra en las Figuras 107 y 108, y el resumen en la Tabla 128.

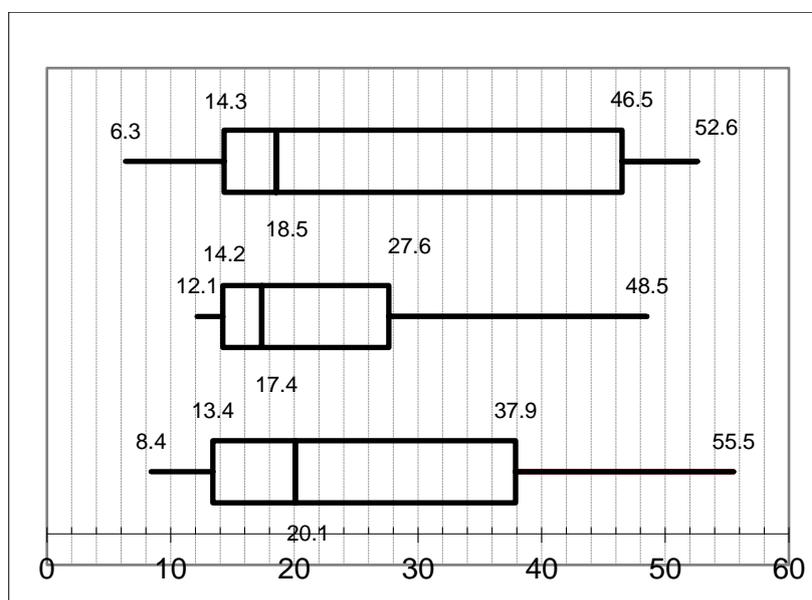


Figura 108: Diagrama de cajas de modelos: LSM, SWAT y LS (arriba - abajo) – Mchique

Tabla 128: Resumen de estadísticos obtenidos con los modelos (Q en mm)- Mchique

Modelo	Mínimo	Q ₁	Mediana	Q ₃	Máximo
Caudales observados	22.51	23.74	25.38	28.89	34.50
Lutz Scholtz	8.42	13.41	20.08	37.89	55.53
SWAT	12.14	14.22	17.37	27.65	48.52
Lutz Scholtz Modificado	6.35	14.33	18.53	46.51	52.60

A continuación, se puede visualizar el cuadro comparativo de los resultados obtenidos del cálculo de los estadísticos de bondad de ajuste, con los tres modelos utilizados en la escala temporal mensual para ambas cuencas (Tabla 129).

Tabla 129: Resumen de indicadores de bondad de ajuste a escala mensual

Indicador	Modelo Lutz Scholtz				Modelo SWAT				Modelo Lutz Scholtz Modificado			
	Anya (C _e = 0.47)	Rdto.	Mchique (C _e = 0.45)	Rdto.	Anya	Rdto.	C. Mchique	Rdto.	Anya	Rdto.	Mchique	Rdto.
NSE	0.59	Satisf.	-20.17	Malo	0.76	Bueno	-7.40	Malo.	0.64	Satisf.	-15.49	Malo
PBIAS	-8.76%	Excel.	-4.58%	Excel.	15.9%	Excel.	-0.11%	Excel.	0.00%	Excel.	2.92%	Excel.
r	0.89	Satisf.	0.58	Satisf.	0.92	Satisf.	0.82	Satisf.	0.92	Satisf.	0.82	Satisf.

En la Tabla 129, podemos concluir que los tres modelos han tenido un buen desempeño en la cuenca Anya, y con el modelo Lutz Scholtz Modificado se ha logrado mejorar los estadísticos de rendimiento de modelos con respecto al modelo Lutz Scholtz tradicional, con el adicional que el modelo modificado es útil para explicar espacialmente lo que ocurre con la humedad del suelo y a su vez, con la capacidad de la cuenca para generar escorrentía a través del mapa de Curva Número; empero, debemos tener datos de humedad del suelo para la caracterización de la humedad antecedente y calcular la precipitación efectiva mensual. En el caso de la cuenca Mchique los resultados no son concluyentes ni satisfactorios. Sin embargo, debemos tener en cuenta que el cambio climático está alterando el ciclo hidrológico, provocando que algunas zonas del planeta pierdan recursos hídricos y otras los ganen. En algunas zonas se han experimentado episodios tanto de exceso como de falta de agua a lo largo de un mismo año debido a una mayor variabilidad estacional (BID 2020). El modelo Lutz Scholtz, al ser un modelo mensual puede ser utilizado en las cuencas de la sierra central del Perú para solucionar problemas relacionados a la evaluación de recursos hídricos y la planificación hidrológica (Sarango *et al.* 2012). El uso del modelo SWAT permitió visualizar la importancia de la representación espacial de las cuencas y adicionar esta característica al modelo Lutz Scholtz tradicional y de ese modo, plantear la modificación que condujo a la obtención del modelo híbrido. Sin embargo, comparativamente, el modelo SWAT es mucho más versátil y su utilidad práctica ha sido demostrada en muchas partes del mundo (Guug 2020; Almeida *et al.* 2018), debido principalmente a que está incorporado a los Sistemas de Información Geográfica (Osei *et al.* 2019) y hace posible modelar el cambio climático (Sharafati 2020; Sowjanya 2018 & Montecelos 2018), por lo que supera en ventajas al modelo Lutz Scholtz.

4.4. PRONÓSTICO CLIMÁTICO EN LAS CUENCAS DE ESTUDIO

Se probaron cinco modelos de cambio climático MCG pertenecientes al CMIP5, los cuales fueron obtenidos desde la página *Climate Explorer*, desde donde se descargaron los datos de precipitación y temperaturas medias mensuales para dos escenarios de emisiones: RCP 4.5 y RCP 8.5, los cuales se detallan en la Tabla 130 a continuación:

Tabla 130: Modelos MCG (CMIP5), país de origen y resolución atmosférica

Nombre del modelo	País	Resolución atmosférica
ACCES1.0	Australia	192 x 145 N96
bcc-csm1-1	China	281 x 279
BNU-ESM	China	142
GISS-E2-rp2	USA	1° x 1°
CMCC-CM	Italia	0.75° x 0.75°

Los resultados de evaluar el cambio climático de los diferentes modelos al 2100 en el escenario RPC 4.5 se visualizan en la Tabla 131, en la cual se puede ver que, de los cinco modelos probados, en cuatro de ellos se espera un aumento de la precipitación y solo en uno, la precipitación disminuye. Respecto a la temperatura, la variación mensual en todos los modelos está alrededor de los 2 °C (aumento).

Tabla 131: Variación de la precipitación y la temperatura mensual en la zona de estudio con modelos MCG al 2100 – RCP 4.5

Mes	ACCES1.0		bcc_csm1		BNU_ESM		GISS_E2_rp2		CMCC_CM	
	Pp (%)	T (°C)	Pp (%)	T (°C)	Pp (%)	T (°C)	Pp (%)	T (°C)	Pp (%)	T (°C)
Ene	8.0%	2.6	-4.4%	1.7	8.3%	1.8	0.7%	1.8	5.1%	2.5
Feb	7.8%	2.5	-6.9%	1.6	9.8%	1.8	2.7%	1.8	18.1%	2.4
Mar	8.1%	2.5	14.8%	1.7	1.3%	1.9	7.9%	1.7	15.6%	2.4
Abr	10.4%	2.6	14.8%	1.7	-0.6%	1.8	11.1%	1.7	21.9%	2.4
May	12.5%	2.7	-13.9%	2.0	-8.4%	2.1	10.4%	1.8	3.3%	2.7
Jun	10.7%	2.9	-3.4%	2.2	13.7%	2.4	25.7%	1.9	11.1%	2.6
Jul	5.8%	2.9	-1.0%	2.4	-20.3%	2.3	19.9%	1.9	-4.5%	2.9
Ago	11.9%	2.8	8.1%	2.1	-11.1%	2.9	12.9%	1.6	-15.0%	3.4
Set	-0.9%	2.8	-0.1%	2.1	6.3%	2.4	-2.4%	1.9	-7.6%	3.5
Oct	-0.5%	2.8	-5.5%	1.9	9.4%	2.3	13.1%	1.6	-4.9%	3.3
Nov	5.2%	2.5	-1.4%	1.7	9.8%	1.8	0.7%	1.8	11.1%	2.8
Dic	10.2%	2.5	-4.1%	1.9	12.3%	1.8	-11.0%	1.8	15.1%	2.5
Prom.	7.4%	2.7	-0.2%	1.9	2.5%	2.1	7.6%	1.8	5.8%	2.8

A continuación, en la Tabla 132 se puede ver los valores promedio de variación de los cinco modelos utilizados, precipitación en porcentaje (%) y temperatura en grados Celsius (°C). En el escenario RCP 4.5, al 2100 se espera un aumento de la precipitación de un 4.63% en promedio y 2.3°C de aumento de la temperatura.

Tabla 132: Valores promedio de variación de 05 modelos CMIP5 escenario RCP 4.5

Mes	Promedio	
	Pp (%)	T (°C)
Ene	3.55%	2.1
Feb	6.29%	2.0
Mar	9.55%	2.0
Abr	11.52%	2.0
May	0.78%	2.2
Jun	11.54%	2.4
Jul	-0.01%	2.5
Ago	1.35%	2.6
Set	-0.94%	2.5
Oct	2.32%	2.4
Nov	5.07%	2.2
Dic	4.49%	2.1
Prom.	4.63%	2.3

Los resultados de evaluar el cambio climático al 2100 en el escenario RCP 8.5 de los diferentes modelos para la zona de estudio se visualizan en la Tabla 133 siguiente:

Tabla 133: Variación de la precipitación y la temperatura en la zona de estudio con modelos MCG al 2100 – RCP 8.5

Mes	ACCES1.0		bcc_csm1		BNU_ESM		GISS_E2_rp2		CMCC_CM	
	Pp (%)	T (°C)	Pp (%)	T (°C)	Pp (%)	T (°C)	Pp (%)	T (°C)	Pp (%)	T (°C)
Ene	7.7%	4.6	24.0%	3.3	12.0%	3.4	-1.4%	3.5	24.2%	4.5
Feb	11.2%	4.5	6.9%	3.2	4.7%	3.2	-4.8%	3.5	20.7%	4.3
Mar	15.6%	4.3	11.8%	3.4	2.8%	3.3	6.2%	3.3	31.7%	4.3
Abr	8.0%	4.5	15.7%	3.5	4.4%	3.5	7.4%	3.4	36.2%	4.5
May	20.4%	4.6	21.7%	4.2	-0.3%	4.0	9.7%	3.5	17.5%	4.8
Jun	9.2%	5.1	-3.0%	4.3	-6.2%	4.6	4.0%	3.5	-3.9%	4.8
Jul	12.2%	5.0	32.8%	4.6	-45.4%	4.9	22.4%	3.4	-8.5%	5.2
Ago	20.5%	5.2	15.6%	4.4	6.1%	4.8	-0.5%	3.3	-0.7%	5.9
Set	3.0%	5.1	6.3%	3.9	-3.0%	4.7	3.8%	3.3	-3.9%	6.0
Oct	-1.3%	5.1	12.0%	3.8	2.3%	4.2	9.8%	3.2	-6.4%	5.9
Nov	9.9%	4.5	9.2%	3.6	7.9%	3.7	1.2%	3.3	14.3%	5.3
Dic	10.4%	4.5	12.9%	3.7	8.4%	3.6	-2.6%	3.3	25.7%	4.7
Prom.	10.5%	4.7	13.8%	3.8	-0.5%	4.0	4.6%	3.4	12.2%	5.0

Para la zona de estudio, en el escenario RCP 8.5, al 2100 se espera un aumento de la precipitación de un 8.14% y 4.2°C en promedio (Tabla 134).

Tabla 134: Valores promedio de variación de 05 modelos CMIP5 escenario RCP 8.5

Mes	Promedio	
	Pp (%)	T (°C)
Ene	13.30%	3.9
Feb	7.75%	3.7
Mar	13.64%	3.7
Abr	14.35%	3.9
May	13.79%	4.2
Jun	0.02%	4.4
Jul	2.70%	4.6
Ago	8.19%	4.7
Set	1.25%	4.6
Oct	3.29%	4.4
Nov	8.51%	4.1
Dic	10.94%	4.0
Prom.	8.14%	4.2

4.5. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO FUTURO DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO

Para el modelamiento hidrológico de las cuencas, se utilizaron y prepararon los datos de precipitación y temperaturas diarias descargadas de la base de datos PISCO del SENAMHI con una extensión de registro de 36 años (del 01 de enero de 1981 y el 31 de diciembre del 2016), para obtener series locales (en ambas cuencas), a los cuales se les aplicó la tasa de variación diaria, preparándolos de manera adecuada (en formato texto) para entrada al modelo SWAT y la inmediata simulación de las descargas en ambas cuencas. Para el modelamiento en cambio climático, se utilizaron los parámetros que arrojaron los mejores indicadores en la calibración de la simulación en situación actual del SWAT para ambas cuencas.

Además, como dato de entrada al SWAT se utilizó la capa de uso de suelo (cobertura vegetal) modelada con la extensión *Land Change Modeler* del programa TerrSet al 2030. Al respecto, podemos afirmar que el cambio de uso y cobertura del suelo *Land Use Land Change* (LULC) por sus siglas en inglés, son los factores más críticos que afectan la intensidad y frecuencia del flujo superficial, así como la erosión del suelo y pérdida de nutrientes. Los reportes de estudios a nivel de cuencas han indicado que los cambios rápidos de LULC podrían tener impactos significativos en los recursos hídricos y son un factor esencial para controlar los recursos hídricos a escala local y global durante el último siglo (Bessa *et al.* 2019).

Se realizó el comparativo entre las descargas observadas y las descargas simuladas al 2100 para los dos escenarios de emisiones (Figura 109). En primer lugar, se visualiza la Tabla 135 que contiene los caudales simulados por el modelo SWAT con los cinco modelos de cambio climático, para el escenario RCP 4.5.

Tabla 135: Caudales simulados (m^3/s) con SWAT, 05 modelos CMIP5- RCP 4.5- cuenca Anya

Mes	Q obs.	Acces	bcc_csm1	BNU_ESM	CMCC_CM	GISS_E2
Ene	0.943	1.019	0.877	1.038	1.007	0.927
Feb	0.723	0.989	0.841	1.021	1.072	0.920
Mar	1.141	1.233	1.250	1.181	1.337	1.197
Abr	0.684	0.829	0.808	0.802	0.900	0.804
May	0.404	0.668	0.627	0.654	0.700	0.642
Jun	0.272	0.548	0.519	0.544	0.578	0.526
Jul	0.249	0.432	0.407	0.422	0.469	0.407
Ago	0.210	0.340	0.322	0.334	0.359	0.328
Set	0.299	0.361	0.346	0.367	0.372	0.347
Oct	0.281	0.324	0.310	0.337	0.332	0.332
Nov	0.377	0.427	0.403	0.463	0.443	0.429
Dic	0.534	0.877	0.737	0.913	0.935	0.693
Prom.	0.510	0.670	0.621	0.673	0.709	0.629
Máx.	1.141	1.233	1.250	1.181	1.337	1.197
Mín.	0.210	0.324	0.310	0.334	0.332	0.328

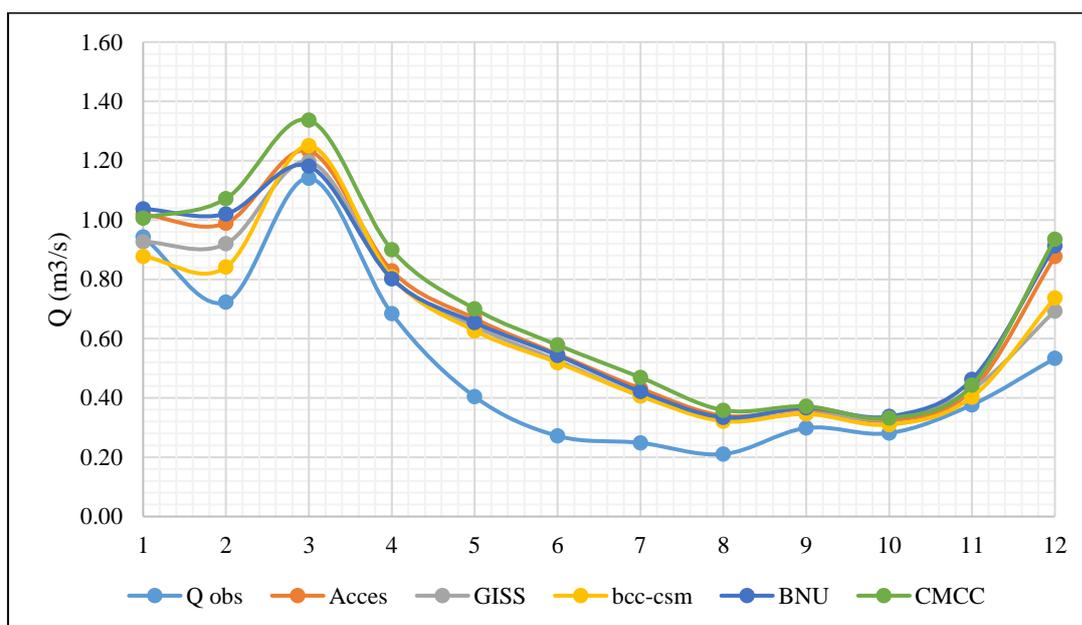


Figura 109: Hidrogramas de simulación con SWAT (RCP 4.5) cuenca Anya

A manera de comentario, en el río Anya al 2100 podemos decir que, según el escenario de emisiones RCP 4.5 habrá un incremento del caudal medio mensual con respecto al caudal actual con todos los modelos probados, siendo el incremento mayor con el modelo CMCC_CM (199 l/s) y el incremento menor resultante sería con el modelo bcc_csm1 (111 l/s) (Figura 110). Estos resultados se explicarían por el aumento de la precipitación en la zona y por el progresivo aumento de la superficie impermeabilizada de la cuenca, debido al proceso de la urbanización acelerada que ocurre en la cuenca Anya por su cercanía con la ciudad de Huancayo. A continuación, se presenta la Tabla 136 con los caudales simulados en SWAT al 2100 con modelos en RCP 8.5

Tabla 136: Caudales simulados (m^3/s) con SWAT, 05 modelos CMIP5 - RCP 8.5- cuenca Anya

Mes	Q obs.	Acces	bcc_csm	BNU_ESM	CMCC_CM	GISS_E2
Ene	0.943	1.003	1.182	1.038	1.203	0.893
Feb	0.723	0.999	1.020	0.960	1.138	0.850
Mar	1.141	1.304	1.301	1.164	1.561	1.149
Abr	0.684	0.815	0.874	0.787	1.000	0.758
May	0.404	0.667	0.702	0.637	0.764	0.610
Jun	0.272	0.545	0.574	0.523	0.630	0.497
Jul	0.249	0.426	0.453	0.402	0.523	0.380
Ago	0.210	0.337	0.358	0.322	0.395	0.306
Set	0.299	0.360	0.383	0.343	0.403	0.336
Oct	0.281	0.318	0.346	0.309	0.355	0.307
Nov	0.377	0.411	0.450	0.408	0.454	0.392
Dic	0.534	0.864	0.914	0.843	1.049	0.736
Prom.	0.510	0.671	0.713	0.645	0.790	0.601
Máx.	1.141	1.304	1.301	1.164	1.561	1.149
Mín.	0.210	0.318	0.346	0.309	0.355	0.306

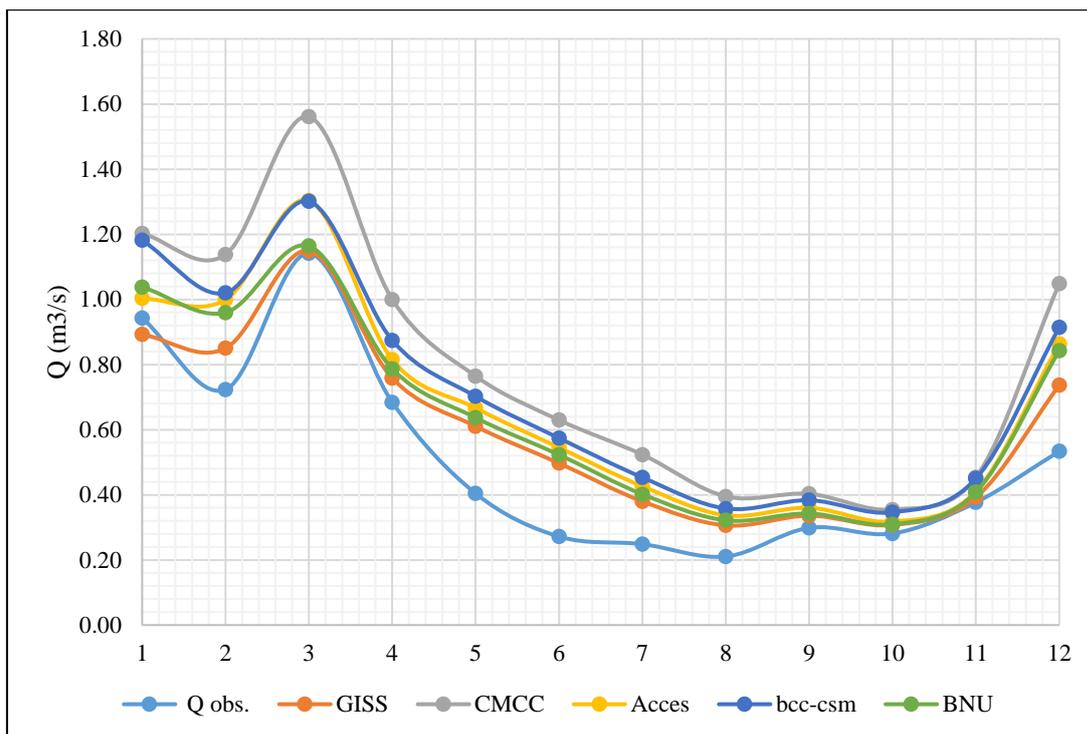


Figura 110: Hidrogramas de simulación con SWAT (RCP 8.5) cuenca Anya

En el río Anya al 2100 en el escenario de emisiones RCP 8.5 habrá un incremento del caudal medio anual con respecto al caudal medio actual, según todos los modelos probados, siendo el incremento mayor con el modelo CMCC_CM (280 l/s) correspondiente a un 54.9% y el incremento menor ocurre con el modelo GISS (91 l/s) que es un 17.8% adicional. El porcentaje de aumento de la precipitación en la zona es de 8.14 % y de 4.2°C como promedio de los cinco modelos para el peor escenario de emisiones (RCP 8.5), asimismo, es de esperarse un aumento de la superficie impermeabilizada de la cuenca por el proceso de urbanización y dada su cercanía con una vía principal que es la carretera central, lo cual incidiría en mayores volúmenes de escurrimiento dentro de la cuenca en un futuro.

En el caso de la cuenca Mchique, el análisis del cambio climático al 2100 con el uso de cinco modelos CMIP5 en dos escenarios de emisiones, reporta que habrá un ligero incremento de los caudales promedio anuales, comparativamente al caudal promedio anual observado actual. Las mayores variaciones del caudal se obtienen con el modelo CMCC_CM en ambos escenarios: 15.4% más de caudal (40 l/s) en RCP 4.5 y 34.6% mayor (90 l/s) en RCP 8.5. (Tabla 137 y Tabla 138).

Tabla 137: Caudales simulados (m^3/s) con SWAT, 05 modelos CMIP5 - RCP 4.5 - cuenca Mchique

Mes	Q obs	Acces	bcc_csm	BNU_ESM	CMCC_CM	GISS_E2
Ene	0.28	0.42	0.34	0.42	0.42	0.36
Feb	0.29	0.61	0.49	0.63	0.69	0.56
Mar	0.35	0.74	0.77	0.69	0.82	0.72
Abr	0.30	0.26	0.24	0.26	0.28	0.24
May	0.28	0.23	0.21	0.23	0.24	0.22
Jun	0.25	0.17	0.16	0.18	0.19	0.16
Jul	0.24	0.15	0.13	0.15	0.16	0.14
Ago	0.22	0.13	0.12	0.13	0.14	0.12
Set	0.22	0.13	0.12	0.13	0.14	0.12
Oct	0.23	0.14	0.13	0.15	0.15	0.14
Nov	0.23	0.17	0.15	0.17	0.18	0.16
Dic	0.26	0.21	0.18	0.22	0.23	0.17
Prom.	0.26	0.28	0.25	0.28	0.30	0.26
Máx.	0.35	0.74	0.77	0.69	0.82	0.72
Mín.	0.22	0.13	0.12	0.13	0.14	0.12

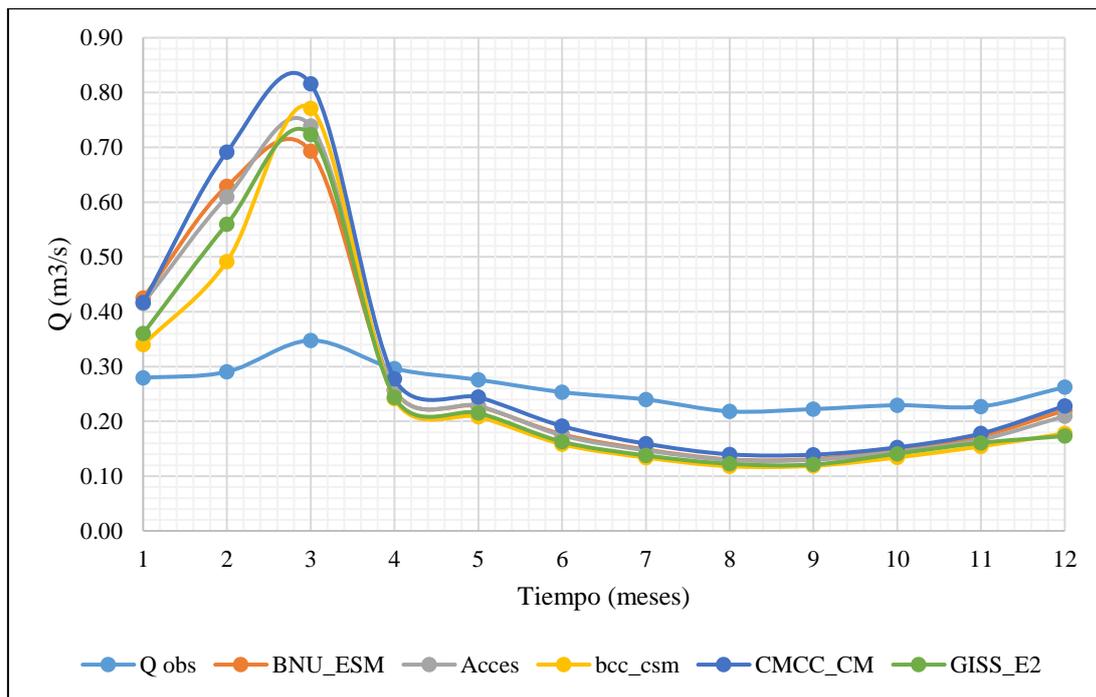


Figura 111: Hidrogramas de simulación con SWAT (RCP 4.5) cuenca Mchique

Tabla 138: Caudales simulados (m^3/s) con SWAT, 05 modelos CMIP5- RCP 8.5- cuenca Mchique

Mes	Q obs.	Acces	bcc_csm	BNU_ESM	CMCC_CM	GISS_E2
Ene	0.28	0.42	0.42	0.43	0.53	0.34
Feb	0.29	0.63	0.63	0.59	0.73	0.50
Mar	0.35	0.80	0.80	0.69	0.97	0.69
Abr	0.30	0.26	0.26	0.25	0.31	0.23
May	0.28	0.23	0.23	0.22	0.27	0.20
Jun	0.25	0.18	0.18	0.17	0.22	0.15
Jul	0.24	0.15	0.15	0.14	0.18	0.13
Ago	0.22	0.13	0.13	0.12	0.16	0.11
Set	0.22	0.13	0.13	0.12	0.16	0.11
Oct	0.23	0.15	0.15	0.14	0.17	0.13
Nov	0.23	0.17	0.17	0.16	0.19	0.15
Dic	0.26	0.21	0.21	0.20	0.27	0.17
Prom.	0.26	0.29	0.29	0.27	0.35	0.24
Máx.	0.35	0.80	0.80	0.69	0.97	0.69
Mín.	0.22	0.13	0.13	0.12	0.16	0.11

Respecto a la forma de los hidrogramas de salidas de caudales medios mensuales de los modelos de cambio climático como resultado de utilizar el modelo SWAT (Figuras 111 y 112), podemos ver que en todos los casos los máximos caudales ocurrirán en el mes de marzo, conservándose el comportamiento del flujo base en los meses de estiaje.

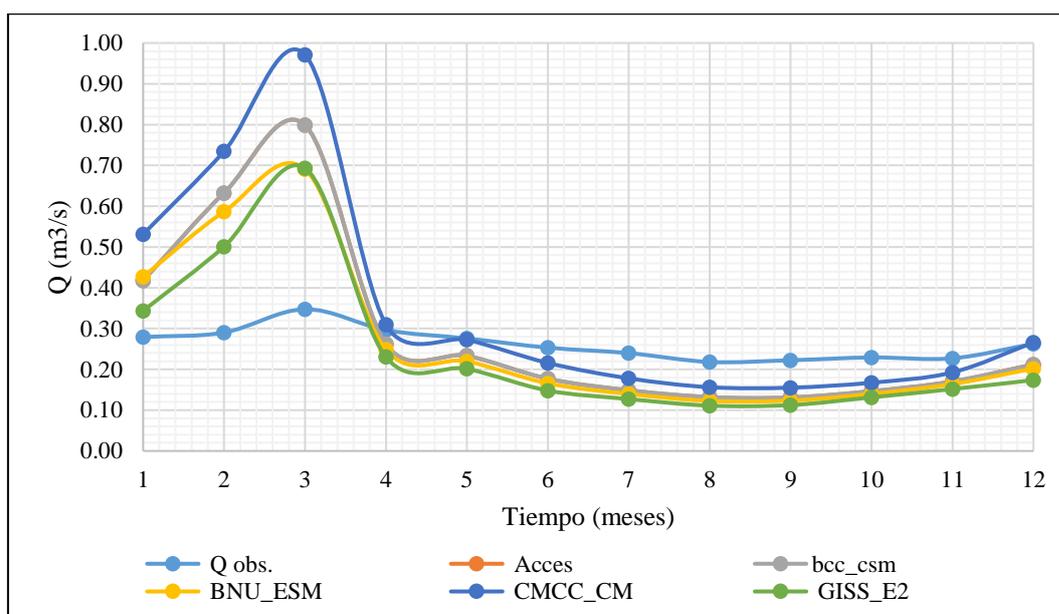


Figura 112: Hidrogramas de simulación con SWAT (RCP 8.5) cuenca Mchique

Según los hidrogramas de salida en la cuenca Mchique, podemos afirmar que las lluvias en marzo serán mucho más intensas de lo que se han venido presentando en la actualidad, además, es muy probable que los caudales en época de estiaje sean menores.

Tabla 139: Tabla resumen de modelamiento hidrológico en SWAT con MCG

Escenario de emisiones	Promedio salida de modelos MCG			
	C. Anya ($Q_{act}=0.51$)		C. Mchique ($Q_{act}=0.26$)	
	Q (m^3/s)	Variación (%)	Q (m^3/s)	Variación (%)
RCP 4.5	0.660	29.4%	0.274	5.4%
RCP 8.5	0.684	34.1%	0.288	10.8%

En la Tabla 139 se presenta un resumen de las proyecciones de caudales mensuales (2070-2100), de las cuencas Anya y Mchique, que supondrían incrementos del caudal promedio; podemos notar que la cuenca Anya tendrá mayores escurrimientos medios anuales (en ambos escenarios de emisiones de CO₂, RCP 4.5 y RCP 8.5), lo cual significaría planificar la reforestación y el manejo de suelos en la cuenca, así como el estricto cuidado de sus tierras de protección. Los caudales en la cuenca Mchique también se incrementarán, pero en menores porcentajes. Estos resultados son similares a los reportados por Alvarez (2015) en su tesis de modelación hidrológica ante el cambio climático en la cuenca del río Lurín, quien determinó que habrá un incremento en la disponibilidad del recurso hídrico (aumento de caudales) y que los periodos húmedos y secos serán más intensos en el futuro. Asimismo, Pilares (2018) en su investigación para la cuenca del río Cabanillas en Puno, obtuvo que la variación promedio anual es positiva en todos los escenarios y modelos probados.

Respecto a la temperatura se obtuvo como resultados que habrá un incremento entre 2.3 °C y 4.2 °C en las cuencas Anya y Mchique pertenecientes a la cuenca del río Mantaro; los resultados son similares a lo reportado por investigadores del SENAMHI, quienes indican que habrá un progresivo incremento de las temperaturas máxima y mínima en toda la zona en relación con el clima actual; reducción de las precipitaciones durante el verano e invierno en los sectores norte y centro principalmente, así como un incremento generalizado en primavera con mayor incidencia en el sector sur de la cuenca del río Mantaro (Avalos *et al.* 2013).

V. CONCLUSIONES

1. Se simularon los procesos hidrológicos de las cuencas Anya y Mchique utilizándose dos tipos de modelos: el modelo Lutz Scholtz que es un modelo determinístico - estocástico a paso mensual y el modelo SWAT el cual es un modelo semidistribuido de paso diario. Se comprobó que el modelo Lutz Scholtz reproduce adecuadamente los escurrimientos del río Anya, sin embargo, tiene problemas para reproducir los caudales del río Mchique. Con el modelo SWAT se logró simular adecuadamente los caudales diarios de ambas cuencas con indicadores estadísticos de bondad de ajuste buenos y satisfactorios.
2. El análisis morfométrico de las cuencas Anya y Mchique pertenecientes a la región Junín con el uso de Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS) permitió establecer que la respuesta hidrológica de las cuencas es diferente, existiendo un riesgo de avenidas moderadas en Anya y bajas en Mchique, siendo sus coeficientes de compacidad (K_c) iguales a 1.28 y 2.06 respectivamente. En el análisis de vulnerabilidad socioeconómica resultó que la cuenca Mchique tiene una vulnerabilidad media y la cuenca Anya una vulnerabilidad compartida entre baja y media, ambas con IDH > 0.5 , existencia de servicios y vías, así como cercanía a la ciudad de Huancayo. Se concluye que, en estas cuencas, con énfasis en Anya, hay un rápido y elevado proceso de impermeabilización de la cobertura, lo cual incidirá en el escurrimiento futuro.
3. De los resultados obtenidos en los indicadores estadísticos de bondad de ajuste, con la aplicación de los modelos Lutz Scholtz y SWAT en las cuencas Anya y Mchique, se puede concluir que el modelo SWAT posee muchas ventajas sobre el modelo Lutz Scholtz; en principio, su capacidad de reproducir de manera espacial la capacidad de escurrimiento de las cuencas porque su ejecución se obtiene en un entorno SIG y sus mapas de entrada: cobertura y suelo, pueden ser actualizados a partir de imágenes

satelitales, además, de ser muy útil para modelar el cambio climático, a partir de registros obtenidos de base de datos como PISCO del SENAMHI y modelos climáticos globales (MCG).

4. Con la actualización del mapa de cobertura vegetal al 2019 se realizó el modelamiento espacial de las cuencas con el módulo *Land Use Modeler* del TerrSet, comprobándose, en Anya y Mchique respectivamente, un aumento de lo siguiente: área urbana (103 y 43 has), plantaciones forestales (336 y 60 has) y cultivos (89 y 206 has), con disminución en herbazales y matorrales (529 y 309 has). Simultáneamente, se extrajo información de cinco modelos climáticos globales (MCG) en dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y 8.5) para simularlos en SWAT. Se logró comprobar que, en los dos escenarios probados, habrá un aumento en la precipitación y la temperatura en la zona, lo cual incidirá en el aumento de la escorrentía superficial. Por tanto, se concluye que habrá un aumento de los caudales en los dos escenarios de emisiones, en Anya del 29.4% (RCP 4.5) y 34.1% (RCP 8.5) y en Mchique del 5.4% (RCP 4.5) y 10.8% (RCP 8.5).

VI. RECOMENDACIONES

1. Los interesados en el modelamiento hidrológico debemos utilizar modelos actuales y en permanente perfeccionamiento como el SWAT, comparativamente con el Lutz Scholtz, porque está comprobada su versatilidad para explicar los procesos de transformación de lluvia en escurrimiento con ayuda de los SIG, además, en sinergia con los aportes del SENAMHI referidos a las bases de datos climáticas como PISCO, es factible determinar los parámetros del modelo SWAT en otras cuencas de nuestro país.
2. Sería pertinente utilizar el modelo Lutz Scholtz en generación de series sintéticas de caudales medios y como técnica de completación de datos medios mensuales. Al respecto, para la estimación de la escorrentía en la sierra central, se recomienda utilizar las relaciones propuestas en esta investigación, ajustando el coeficiente “b” según las características geológicas de la cuenca.
3. Utilizando como herramienta el modelo SWAT, complementar este trabajo con otros referidos al análisis y calibración de diferentes procesos hidrológicos que ocurren en las cuencas, como, por ejemplo, la evapotranspiración potencial y real, el aporte del flujo subterráneo al flujo base y la erosión hídrica producida en las cuencas.
4. Es importante tomar este trabajo como base para una investigación en modelamiento espacial de cuencas andinas, que permita entender las causas que originan el cambio de uso y cobertura del terreno que, son diferentes en cada cuenca, profundizando en la influencia de los factores ambientales y socioeconómicos que afectan los usos del suelo y que a su vez influyen en la cantidad y calidad de los recursos hídricos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, M.; Bathurst, J.; Cunge, J.; O'Connell, P. & Rasmussen, J. 1986. An introduction to the European Hydrological System- Système Hydrologique Européen "SHE". *Journal of Hydrology*, 87, 45-77.
- Acuña, D. 2011. Escenarios de cambio climático en las regiones de Cusco y Apurímac al 2030 y 2050. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Ministerio de Ambiente. En el marco del Programa de Adaptación al Cambio climático – PACC. 124 pp.
- Alcántara, F. 2015. Modelo de geoformaciones cóncavas para recargas de agua subterránea en cabeceras de cuenca del río Jequetepeque, Cajamarca. (Tesis de Doctorado). Lima-Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
- Almeida, R., Pereira, S. y Pinto, D. 2018. Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT para la cuenca del río Mucuri. *Engenharia Agrícola*, 38(1), 55-63. <https://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n1p55-63/2018>.
- Alvarez, T. & Villaverde, R. 2015. Balance hídrico futuro en la cuenca del río Lurin a través de la modelación hidrológica ante el cambio climático. (Tesis de Grado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2157>.

- Autoridad Nacional del Agua (ANA). 2019. Consejo de Recursos Hídricos de la cuenca Mantaro. Caracterización socioeconómica. Recuperado de: <https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/mantaro/VC>.
- Aparicio, F. 1996. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Editorial Limusa.
- Arnold, J.G.; Moriasi, D.N.; Gassman, P.W. 2012. *SWAT: Model use, calibration, and validation*.
- Arroyo, J.; Machuca, E.; Gurmendi, P. 2013. Balance Hídrico superficial mediante el método del Índice Climático del Valle del Mantaro, 2010 al 2013. *Apunt. Cien. Soc.* 03(01): 6-15. DOI: 10.18259/acs.2013002.
- ASCE-EWRI. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. In: Allen, R.G., Walter, I.A., Elliot, R.L., *et al.* (Eds.), Environmental and Water Resources Institute (EWRI) of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Final Report. American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA, 213 pp.
- Ashu, A. & Lee, S. 2020. Reutilización de agua de drenaje agrícola en una cuenca de uso de suelo mixto. *Agronomía*, 9 (1), 6; <https://doi.org/10.3390/agronomy9010006>.
- Asurza, F. & Lavado, W. 2020. Estimación de parámetros regionales del modelo SWAT: metodología y aplicación a cuencas hidrográficas en el drenaje del Pacífico peruano. *Agua*, 12 (11), 3198. <https://doi.org/10.3390/w12113198>.
- Avalos, G.; Oria, C.; Jacome, G.; Acuña, D.; Llacza, A., & Cubas, F. 2013. Cambio climático en la cuenca del río Mantaro, proyecciones para el año 2030. SENAMHI. Lima – Perú.
- Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. 2017. Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI – DHI - 2017, Lima-Perú. Recuperado de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>.

- Bako, M. & Hunt, D. 1988. Derivation of baseflow recession constant using computer and numerical analysis. *Hydrol. Sci. J.* 33(4), 357- 367.
- Bao, H.; Wang, L.; Li, Z.; Zhao, L.; Zhang, G. 2010. Hydrological daily rainfall - runoff simulation with BTOPMC model and comparison with Xin'anjiang model. *Water Science and Engineering* 3(2):121-131. DOI: <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.02.001>.
- Barnes, B. 1939. The structure of discharge – recession curves. *Trans. Am. Geophys. Un.*, 721-725.
- Bautista, F.; Rodríguez, J.; Watts, C.; Vivoni, E.; Yépez, E.; Robles, A.; Garatuza, J.; Tarin, T. & Schreiner, A. 2013. Calibración *in situ* del sensor cosmos para determinar humedad del suelo en escalas intermedias (~1 km). *Terra Latinoamericana*, 31(4), 315-324. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n4/2395-8030-tl-31-04-00315.pdf>.
- Bessa, R.; Sanches, L.; Vitor, R. & Leal, F. 2019. Hydrologic Impacts of Land Use Changes in the Sabor River Basin: A Historical View and Future Perspectives. *Water*. 11, 1464. doi:10.3390/w11071464.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). 2020. De estructuras a servicios. El camino a una mejor infraestructura en America Latina y el Caribe. Recuperado de: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/De-estructuras-a-servicios-El-camino-a-una-mejor-infraestructura-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>.
- Buytaert, W.; De Bièvre, B. 2012. Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research* 48, W08503, doi:10.1029/2011WR011755, 2012.
- Camones, A. 2015. Influencia de la humedad del suelo en la relación precipitación-escorrentia en las cuencas del Anya y Mchique, Junín – Perú. (Tesis de Grado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2158>.

- Campos, C. 2014. Efecto de la fertilización en el rendimiento y características biométricas del cultivo de papa variedad Huayro en la comunidad de Aramachay (valle del Mantaro). (Tesis de Grado). Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1390>.
- Cano, C.; Andreoli, A.; Arumi, J.L. & Rivera, D. 2014. Uso de imágenes de satélite para evaluar los efectos de cambio de cobertura de suelo en la escorrentía directa de una cuenca andina. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(4), 145-151. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000400009&lng=es&tlng=es.
- Casas, S. & Lavado, W. 2016. Desempeño de los modelos hidrológicos SWAT y GR2M en la cuenca hidrológica del Amazonas en Perú: cuenca del río Mayo. Póster del Programa de Doctorado en Recursos Hídricos de la UNALM. Lima, Perú. Recuperado de: <https://ceap.org.pe/wp-content/uploads/2018/09/poster-final-modelo-2grm-y-swat-r%C3%ADo-mayo-1.pdf>.
- Castany, G. 1971. *Tratado práctico de las aguas subterráneas*. Barcelona, España; Ediciones Omega.
- Castañeda, M. & Barros, V. 1994. Las tendencias de la precipitación en el cono sur de América al este de los andes. *Revista Meteorológica*. pp. 23- 32.
- Castillo, F. y Sarria, F. 2018. Efecto de la subdivisión de cuencas en la estimación de variables climáticas en la simulación hidrológica con el modelo SWAT en cuencas semiáridas mediterráneas. *Papeles de Geografía* 114-133. DOI: <https://doi.org/10.6018/geografia/2018/331531>.
- Ccori, G. 2019. Modelación en WEAP y RSMInerve para la proyección hidrológica futura de la microcuenca Mchique- Sincos- Huancayo. (Tesis de Grado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4311>.
- Chow, V.T.; Maidment, D. & Mays, L. 1994. *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill. 584 pp.

- Cifuentes, M. 2010. ABC del cambio climático en Mesoamérica. Informe Técnico N°383. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 71 pp.
- Clarke, J. 1968. Altimetric frequency curve. In: R.W. Fairbridge (ed.): The Encyclopedia of Geomorphology. Reinhold Book Co., 1114 pp.
- Córdova, M. 2015. Estimación de caudales medios naturalizados en la cuenca del Río Mantaro mediante el método de regionalización estadística. (Tesis de Grado). Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6273>.
- Corredor, J.L. & Peñaranda, V.M. 2012. Identificación de los parámetros del modelo del número de curva y su incertidumbre mensual en la cuenca alta del río Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22(1), 75. DOI: <https://doi.org/10.18359/rcin.250>.
- Cotler, H. 2010. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Cruz, B.; Gaspari, F.; Rodríguez, A.; Carrillo, F. & Telles, J. 2015. Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Revista Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. N°64: 26-34. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/674/67441039004.pdf>.
- Del Aguila, S. & Mejía, A. 2021. Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú utilizando Sistemas de Información Geográfica. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*. 12(2): 1-20. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-02-12.
- Delgadillo, A. & Moreno, A. 2013. Morfometría de cuencas. Recuperado de <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/MORFOMETR%CDA%20DE%20CUENCAS.pdf>. R
- Demuth, S. 1989. The application of the West German IHP recommendations for the analysis of data from small research basins. In: FRIENDS in Hydrology

- Devia, G.; Ganasri, B.; Dwarakish, G. 2015. A Review on Hydrological Models. Aquatic Procedia (Serie International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering - ICWRCOE'154:1001-1007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>.
- Díaz, A.D. & Mercado, T.M. 2017. Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. Ingeniería y desarrollo. *Revista de la División de Ingeniería de la Universidad del Norte*, 35(2), 452-470.
- Estrela, T. 1992. Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos (en línea). Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, España, s.e. 56 p. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaca/fulltext/modelo.pdf>.
- FAO. 1979. A provisional methodology for soil degradation assessment. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma.
- FAO. 1996. Forest Resources Assessment 1990- Survey of tropical forest cover and study of change processes. FAO Forestry Paper 130, Roma: FAO.
- Fatichi, S.; Vivoni, E.; Ogden, F.; Ivanov, V.; Mirus, B.; Gochis, D.; Downer, C.W.; Camporese, M.; Davison, J.; Ebel, B.; Jones, N.; Kim, J.; Mascaro, G.; Niswonger, R.; Restrepo, P.; Rigon, R.; Shen, C.; Sulis, M. & Tarboton, D. 2016. An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology. *Journal of Hydrology* 537:45-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.026>.
- Fernández, M.; Vela, A.; Castaño, S. 1997 La utilización de modelos en Hidrología. *Revista de la Facultad de Educación de Albacete - España*. N°12. 305-318. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2291881>.
- Fernández, C. 2017. Modelamiento Hidrológico de la Región Hidrográfica del Titicaca. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología. Recuperado de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-44.pdf>.

- Fiseha, B.; Melesse, A.; Romano, M.; Volpi, E. & Fiori, A. 2012. Statistical Downscaling of Precipitation and Temperature for the Upper Tiber Basin in Central Italy. *International Journal of Water Sciences*; Rijeka Tomo 1. DOI: 10.5772/52890.
- Freeze, R. & Harlan, R. 1969. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*. 9(3), 237-258. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(69\)90020-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90020-1).
- García, F. 2016. ¿Qué es el IPCC? Recuperado de: <http://revistatiempodepaz.org/wp-content/uploads/2019/12/TP-120-%C2%BFY-despu%C3%A9s-de-la-cumbre-de-Par%C3%ADs.pdf#page=10>
- Gaspari, F.; Senisterra, G. & Marlats, R. 2007. Relación precipitación – escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 39(1): 21-28. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382837653003>.
- Gil, E.; Tobón, C. 2016. Modelación hidrológica con TOPMODEL en el páramo de Chingaza, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 69(2):7919-7933. DOI: <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59137>.
- Gomariz, F. & Alonso, F. 2018. Efecto de la subdivisión de cuencas y la estimación de variables climáticas en la simulación hidrológica con el modelo SWAT en cuencas semiáridas mediterráneas. *Papeles de Geografía*. 64. 114-133. DOI: <http://dx.doi.org/10.6018/geografia/2018/331531>.
- Gómez-Isidro, S. & Gómez-Ríos, V. 2016. Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: Cuenca del río Suratá y cuenca del Río de Oro (Santander, Colombia). *Dyna* 83(196): 213-222. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n196.53222>.

- Gonzales de Matauco, A. 2004. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicados a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* (38):311-330.
- Grados, D. 2012. Estudio de avenidas en las cuencas del Anya y Mchique, departamento de Junín, Perú (Período 2011-2012). (Tesis de Grado). Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Guabloche, J. & Saldarriaga, M. 2013. Aspectos económicos y sociales de la región Junín, Revista Moneda, Banco Central de Reserva del Perú. 155: 2-17. Recuperado de: <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Revista-Moneda/moneda-155/moneda-155-02.pdf>
- Guevara, E. 2015. Métodos para el Análisis de Variables Hidrológicas y Ambientales. Ministerio de Agricultura y Riego -MINAGRI- Autoridad Nacional del Agua –ANA- Lima, Perú.
- Guug, S.; Abdul-Ganiyu, S., & Kasei, R. 2020. Application of SWAT hydrological model for assessing water availability at the Sherigu catchment of Ghana and Southern Burkina Faso. *HydroResearch*. 3,124–133. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.10.002>.
- Gutiérrez, R. 2015. Eficiencia de la fertilización nitrogenada en el cultivo de papa *solanum tuberosum* cv Yungay en Colpar, distrito de Quilcas-Huancayo. (Tesis de Grado). Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/984>.
- Hamdy, O.; Zhao, S.; Salheen, M.A. & Eid, Y.Y. 2017. Analyses the driving forces for urban growth by using IDRISI Selva models abouelreesh - aswan as a case study. *Int. J. Eng. Technol.* 9(3): 226 - 232. <https://doi.org/10.7763/ijet.2017.v9.975>.
- Hawkins, R. 1996. Initial Abstraction and Loss in the Curve Number Method. Arizona Hydrological Society Proceedings.

- Henríquez, C. & Azócar, G. 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (36), 61-74. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000200004>.
- Horton, R. 1945. Erosional development streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. America Bull.* 56: 275-280.
- IBAL S.A. 2009. Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de las microcuencas de las quebradas Las Panelas y La Balsa. Recuperado de: http://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/cuenca_panelas/DIAGNOSTICO/2.2ASPECTOS_BIOFISICOS.pdf.
- Ibáñez, S.; Moreno, H.; Gisbert, J. 2011. Morfología de las cuencas hidrográficas. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universidad Técnica de Valencia, España.
- Instituto Geofísico del Perú (IGP). 2005. Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la Cuenca del Río Mantaro. Vol. I, II y III.
- Instituto Geofísico del Perú (IGP). 2010. Cambio climático en la cuenca del río del Mantaro: Balance de 7 años de estudio. Recuperado de: <https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/IGP/710/cambioclimaticocuencariomantaro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). 2010. Mapa de pobreza provincial y distrital 2009. El enfoque de la pobreza monetaria. Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú. Recuperado de: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/1120>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). 2015. Mapa de pobreza provincial y distrital 2013. Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú. Recuperado de:

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1261/Libro.pdf

Instituto Nacional de Ecología. 2004. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Instituto Geológico y Minero de España. 2008. Guía metodológica para la determinación de los caudales ambientales. Capítulo de aguas subterráneas. Recuperado de: http://info.igme.es/SidPDF/131000/466/131466_0000001.pdf.

IPCC. 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers, Working Group 1 IPCC, Geneva.

IPCC. 2007b. Climate Change 2007: Impacts and Vulnerability, Summary for Policy Makers, Working Group 2 IPCC, Geneva.

IPCC. 2013. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policymakers, Estocolmo, 2013. 36 pp.

Jardí, M. 1985. Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. Revista de Geografía, N°XIX, 41-68. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/39036417.pdf>.

León, R. 2017. Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático. (Tesis de Grado). Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2877>.

Linsley, R. & Hohler, M. 1977. *Hidrología para Ingenieros*. Editorial Mc Graw-Hill. 386 pp.

- Longobardi, A. & Villani, P. 2013. The use of micrometeorological data to identify significant variables in evapotranspiration modeling. *Procedia Environmental Sciences* 19: 267 – 274. doi: 10.1016/j.proenv.2013.06.031.
- López, F. 1998. *Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España: TRAGSA, TRAGSATEC y Mundi-Prensa.
- López, A.; Ríos, M.; Flamenco, A. & Farfán, M. 2019. Análisis y modelación espacial de los patrones de deforestación (2005- 2025) en la microcuenca La Unión del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. *Sociedad y Ambiente*, (18), 117-143. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-65762018000300117&lng=es&tlng=es.
- Llamas, J. 1993. *Hidrología general: Principios y Aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. España. 635 p.
- Llauca, O. 2014. *Estudio del Balance Hídrico Superficial de las cuencas del Anya y del Mchique, departamento de Junín, Perú. (Tesis de Grado)*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1833>.
- Mahmood, R.; Pielke, R.; Hubbard, K.; Niyogi, D.; Bonan, G.; Lawrence, P.; McNider, C. McAlpines, C.; Etter, A.; Gameda, S.; Qian, B.; Carleton, A.; Beltran- Przekurat, A.; Chase, T. & Quintanar, A. 2010. Impacts of land use/land cover change on climate and future research priorities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91(1):37-46. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2769.1>
- Martínez, C. 2014. *Impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica. (Tesis de Grado)*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1849>.
- Mejía, A. 2017. *Probabilidad y Estadística en Hidrología*. Lima, Perú: Fondo Editorial UNALM. 194 pp.

- Méndez, W. & Marcuzzi, E. 2006. Análisis morfométrico de la microcuenca de la quebrada Curucutí, estado Vargas - Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 47(1): 29-55.
- Méndez, W. 2016. Análisis cuantitativo del relieve en cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo “El Ávila” (estado Vargas, Venezuela) y su significado hidrogeomorfológico. Recuperado de: <http://www.elsevier.es/es-revista-investigaciones-geograficas-boletin-del-instituto-118-pdf-S0188461117300031>.
- Mendoza, M.; Bocco, G.; Siebe, C.; Ortiz, M. 2002. Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112002000100004&lng=es&tlng=es.
- Miller, 1953. A quantitative geomorphic study of drainage in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Office of Naval Research, Geography Branch, Project NR 389-042, Technical Report, 3, Columbia University.
- MINAM. 2015. Mapa de zonificación ecológica económica del departamento de Junín. Sistema Nacional de Información Ambiental - SINIA. Recuperado de: <http://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/junin/>.
- Mishra, S.K. & Singh, P.V. 2004. Long-term hydrological simulation based on the soil conservation service curve number. *Hydrological Processes*, 18(7):1291–1313.
- Mishra, V.N.; Rai, P.K. & Mohan, K. 2014. Prediction of land use changes based on land change modeler (LCM) using remote sensing: a case study of Muzaffarpur (Bihar), India. *J. Geogr. Inst. Jovan Cvijic* 64(1):111-127. <https://doi.org/10.2298/IJGI1401111M>.
- Mockus, V. 1964. Estimation of direct runoff from storm rainfall. En National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, Soil Conservation Service, Ed. USA: USDA.

- Monsalve, S. 1999. Hidrología en la Ingeniería. Santa Fé de Bogotá: Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- 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 en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Recuperado de: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2531>.
- Moriassi, D.; Arnold, J.; Van Liew, M.; Bingner, R.; Harmel, R. & Veith, T. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50, 885-900.
- Muche, M.E.; Hutchinson, S.L.; Hutchinson, J.M.S.; & Johnston, J.M. 2019. Phenology-adjusted dynamic curve number for improved hydrologic modeling. *Journal of Environmental Management*, 235, 403-413. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.115>.
- Musgrave, G. 1955. How much of the rain enters the soil? In: Water Yearbook of Agriculture, U.S. Department of Agriculture, pp: 151-159.
- Najarro, D. 2015. Calibración del modelo de Lutz Scholtz y generación de caudales extendidos aplicado a la cuenca del río Chacco (en línea). Ayacucho, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Recuperado de: <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/794>.
- Nathan, R. & McMahon, T. 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>.
- Neitsch, S.; Arnold, J.; & Kiniry, J. 2005. Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000.

- NRCS. 2004. Estimation of direct runoff from storm rainfall. En Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, Natural Resources Conservation Service, Ed. USA: USDA, cap. 10, pp. 1-8.
- Ocampo, O. & Vélez, J. 2013. Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, Colombia. DOI: <https://doi.org/10.22395/rium.v13n24a3>
- Ochoa, B.; Buytaert, W.; De Bièvre, B.; Céleri, R.; Crespo, P.; Villacís, M.; Llerena, C.; Acosta, L.; Villazón, M.; Guallpa, M.; Gil, J.; Fuentes, P. Olaya, D.; Viñas, P.; Rojas, G. & Arias, S. 2016. Impact of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hidrological Processes*. 30, 4074-4089. DOI: 10.1002/hyp.10980.
- Oñate, F. & Bosque, J. 2010. Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios of hydrological modeling. *Journal of Hydrology*. 395, p. 256-263. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.10.033.
- Osei, M. A., Amekudzi, L. K., Wemegah, D. D., Preko, K., Gyawu, E. S., & Obiri-Danso, K. 2019. The impact of climate and land-use changes on the hydrological processes of Owabi catchment from SWAT analysis. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25, 100620. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100620>
- Oviedo, B. & León, G. 2010. Guía de procedimiento para la generacion de escenarios de Cambio Climatico Regional y Local a partir de los Modelos Globales. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- PMFS. 2011. Programa de Manejo Forestal Sostenible. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Plan Meriss II. (1980). Generación de caudales mensuales en la sierra peruana - Plan Meriss II. s.l., s.e.

- PDC. 2013. Plan de Desarrollo Concertado del distrito San Pedro de Saño- Huancayo. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/294120690/PDC-SANO-2013-2021>.
- Pereira, D.; Martínez, M.; da Silva, D.; Pruski, F. 2016. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 5:149-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.008>.
- Pérez, J. 1979. Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas, Venezuela. 38 pp.
- Pérez-Soba, I. 2015. El régimen torrencial: restauración hidrológico-forestal. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/308208786_El_regimen_torrencial_restauracion_hidrologico-forestal.
- Pilares, I. 2018. Disponibilidades hídricas reguladas del reservorio Lagunillas y Rio Verde para usos múltiples en la cuenca del río Cabanillas. (Tesis de Doctorado). Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3675>.
- Pizarro, R. 1996. Análisis comparativo de modelos matemáticos precipitación- escorrentía en cuencas de España peninsular. Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. España. 320 pp.
- Pizarro, R. & Torres, I. 1998. Propuesta de un modelo matemático para la caracterización global del proceso precipitación – escorrentía en zonas semiáridas. Actas del I Congreso Latinoamericano IUFRO. Corporación Nacional Forestal, IUFRO. Valdivia, Chile.
- Plesca, E.; Timbea, J.; Exbrayat, D.; Windhorst, P.; Krafta, P.; Crespo, K.; Vache, H.; Frede & Breuer, L. 2012. Model intercomparison to explore catchment functioning: results

from a remote montane tropical rainforest. *Ecological Modeling*. 239, pp. 3-13. DOI: 10.1016 / j.ecolmodel.2011.05.005

Ponce, V.M. 1989. *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Racca, J. 2010. Geomorfología de la cuenca del Arroyo del Medio. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*: 30.

Ramos, R.; Palomeque, M.A; Núñez, J. & Sánchez, R. 2019. Análisis geomático espacial del cambio de uso del suelo en Huimanguillo, Tabasco (2000-2010-2030). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 10(53): 118-139. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i53.555>.

Remesan, R. & Holman, I. 2015. Effect of baseline meteorological data selection on hydrological modelling of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 528: 631–642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.026>.

Riahi, K.; Rao, S.; Krey, V.; Cho, C.; Chirkov, V.; Fischer, G.; Kindermann, G.; Nakicenovic, N. & Rafaj, P. (2011). A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109: 33–57. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.

Romero, A.; López, F.; Belmonte, F. 1998. Erosión y escorrentía en el Campo Experimental de «El Ardal» (Murcia). Nueve años de experiencias. *Papeles de Geografía*, 27: 129-144. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/39434933>.

Romero, A. & López, F. 1987. Morfometría de Redes Fluviales: Revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía* Núm. 12, 47-62. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/28221147>.

Rui, X. F. 2004. *Principle of Hydrology*. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press.

- Rui, X.; Liu, N.; Li, Q. & Liang, X. 2013. Present and future of hydrology. *Water Science and Engineering*, 6(3): 241-249. doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2013.03.001.
- Rui, X. & Jiang, C. 2010. Revisión de la investigación de la interacción de procesos hidrogeomorfológicos. *Advances in Water Science*, 21(4): 444 – 449.
- Ruiz, O.; Arteaga, R.; Vázquez, M.; Capurata, R.; López, R. 2012. Balance hídrico y clasificación climática del Estado de Tabasco, México. 14.
- Salazar, P. 2016. Percepción, vulnerabilidad socioeconómica y adaptación al cambio climático del ganadero lechero del valle del Mantaro, Junín. Tesis para optar el grado de Magister Scientiae en Producción Animal. Escuela de Posgrado – UNALM. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2748/L01-S343-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sánchez, C. 2003. Caracterización de la retención máxima de humedad en el suelo del método SCS-CN. Aplicación a una cuenca de México. pp. 111-117.
- Sarango, D.; Rozas, G.; Salvador, B.; Velásquez, T.; Sillca, J. & Mancilla, J. 2012. Determinación del rendimiento hídrico en la cuenca alta del río Grande en Puno. *Rev. Inv. Fis. UNMSM*. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/fcaf/704e1f1a69bfe131157e8d1a3f04e169290b.pdf>.
- Sarkar, R.; Dutta, S. & Dubey, A. 2015. An insight into the runoff generation processes in wet sub-tropics: Field evidences from a vegetated hillslope plot. *Catena*, 128, 31-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.006>.
- Scheidegger. 1987. *Theoretical Geomorphology*. Springer - Verlag Berlín Heidelberg.
- Schmitz, C.; Kreidenweis, U.; Lotze-Campen, H.; Popp, A.; Krause, M.; Dietrich J. & Müller. C. 2015. Agricultural trade and tropical deforestation: interactions and related policy options. *Regional Environmental Change* 15(8):1757-1772. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0700-2>.

- Schumm, 1956. *The fluvial system: New York*. John Wiley & Sons, 338 pp.
- Sharafati, A. & Pezeshki, E. 2020. A strategy to assess the uncertainty of a climate change impact on extreme hydrological events in the semi-arid Dehbar catchment in Iran. *Theor Appl Climatol* 139, 389–402. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02979-6>.
- Sherman, L. 1932. La relación de los hidrogramas de escorrentía con el tamaño y el carácter de las cuencas hidrográficas. *EOS*, 13(1): 3-401. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00332>.
- SINEACE. 2017. Caracterización de la región Junín. Sistema Nacional de Evaluación Acreditación y Certificación de la Calidad Educativa. Recuperado de: <https://www.sineace.gob.pe/wp-content/uploads/2018/04/Caracterizaci%C3%B3n-de-la-regi%C3%B3n-Jun%C3%ADn-2018-Sineace.pdf>
- Singh, V.P. 1992. *Elementary Hydrology*. Editorial Prentice Hall. 973 pp.
- Smakhtin, V.U. 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*. Volume 240: 3–4, 147-186. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1).
- Sowjanya, P.; Reddy, K. & Shashi, M. 2020. Intra- and interannual streamflow variations of Wardha watershed under changing climate. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 26:2, 197-208, DOI: 10.1080/09715010.2018.1473057.
- Sorooshian, S.; Hsu, K.; Coppola, E.; Tomassetti, B.; Verdecchia, M. & Visconti, G. 2008. Hydrological modelling and the water cycle: coupling the atmospheric and hydrological models. Springer Science & Business Media.
- Spruill, C.A.; Workman, S.R. & Taraba J.L. 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. Recuperado de: <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/50577471e4b01ad7e027c6d2>.

- Stehr, A. 2008. Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua, bajo escenarios de cambio climático, para dos subcuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana. (Tesis Doctorado). Universidad de Concepción. Chile.
- Strahler. 1952. Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America* 63: 1117-1142.
- Taylor, A. & Schwarz, H. 1952. Unit-hydrograph lag and peak flow related to basin characteristic. *Transactions American Geophysical Union*. 33(2), 235-246.
- Taylor, K.; Stouffer, R. & Meehl, G. 2012. An overview of CMIP5 and the experimental design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485–498.
- Tegosa, A.; Efstratiadis, A.; Malamos, N.; Mamassis, N. & Koutsoyiannis, D. 2015. Evaluation of a Parametric Approach for Estimating Potential Evapotranspiration across Different Climates. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4: 2 – 9. doi:10.1016/j.aaspro.2015.03.002.
- Tenelanda, D.; Crespo, P. & Mosquera, G. 2018. Umbrales en la respuesta de humedad del suelo a condiciones meteorológicas en una ladera Altoandina. *Maskana*, 9(2), 53-65. DOI: <https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.07>
- Terán, C. 2014. Volumen de agua aprovechable en la microcuenca del río Tres Ríos, usando el modelo determinístico estocástico Lutz Scholtz validado para los años hidrológicos 2008 - 2012. Recuperado de: <https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/28891/TesisA4.pdf?sequence=1>.
- Ticona, J. 2013. Implementación de Redes Neuronales en el modelo de Generación de Caudales de Scholtz aplicado en cuencas hidrográficas del Perú. (Tesis de Grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perú. Recuperado de: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3452>

- Torres, E.; Fernández, D.; Oropeza, J.; Mejía, E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca “El Tejocote” Atlacomulco, Estado de México.
- Torres, A.; Ramos, J. & Gracia, J. 2014. Evaluación de mediciones in situ de humedad de suelo a escala puntual: sensores alámbricos e inalámbricos. Congreso de Instrumentación, Jalisco – México. Recuperado de: <http://somi.ccadet.unam.mx/somi29/memoriassomi29/PDFS/Instrumentacion/153-ANSOMI-19-153.pdf>.
- Uribe, N. 2010. Conceptos básicos y guía rápida para el usuario: versión SWAT 2005. Recuperado de: <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- USDA- SCS. 1967. Hydrology. Section 4. Part I. Watershed planning. En: National Engineering Handbook. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Suelos, Washington DC.
- Usuga, J. & Pauwels, V. 2008. Utilización de sensores de humedad para la determinación del contenido de humedad del suelo (ecuaciones de calibración). SUELOS ECUATORIALES 38(1): 24-33. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/293350916>
- Valdivieso, F.; Naranjo, G. 2003. Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo. En Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográfica. s.l., s.e. p. 8–13.
- Vélez, J.; Botero, A. 2011. Estimación del Tiempo de Concentración y Tiempo de Rezago en la cuenca experimental urbana de la Qda. San Luis, Manizales. Dyna 78(165). Recuperado de: <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=49622372006>.
- Vieux, B.; Gaur, N. 2008. Finite-element modeling of storm water runoff using GRASS GIS. s.l., s.e., vol.9. 263 p. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.1994.tb00334.x>.
- Villón, M. 2002. Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Agrícola. Cartago – Costa Rica. 433 pp.

- Vuille, M. 2007. Climate change in the Tropical Andes – Impacts and consequences for glaciation and water resources. Part I, II and III. A report for CONAM and the World Bank.
- Walega, A.; Amatya, D.M.; Caldwell, P.; Marion, D.; and Panda, S. 2020. Assessment of storm direct runoff and peak flow rates using improved SCS-CN models for selected forested watersheds in the Southeastern United States. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100645. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100645>
- Weber, J.; Dasso, C. & Jorquera, E. 2010. Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. *Mecánica Computacional*, vol XXIX, 4013-4037.
- Wittenberg, H. 1994. Nonlinear analysis of flow recession curves. *IAHS Publ.* 221: 61-67.
- Zubieta, R. 2013. Modelado hidrológico distribuido de la cuenca amazónica peruana utilizando precipitación obtenida por satélite. (Tesis de Maestría). Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 110 pp.
- Zúñiga, R.; Muñoz, E. & Arumí, J. 2012. Estudio de los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. *Obras y proyectos*, 11, 69-78. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-28132012000100007>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Panel fotográfico

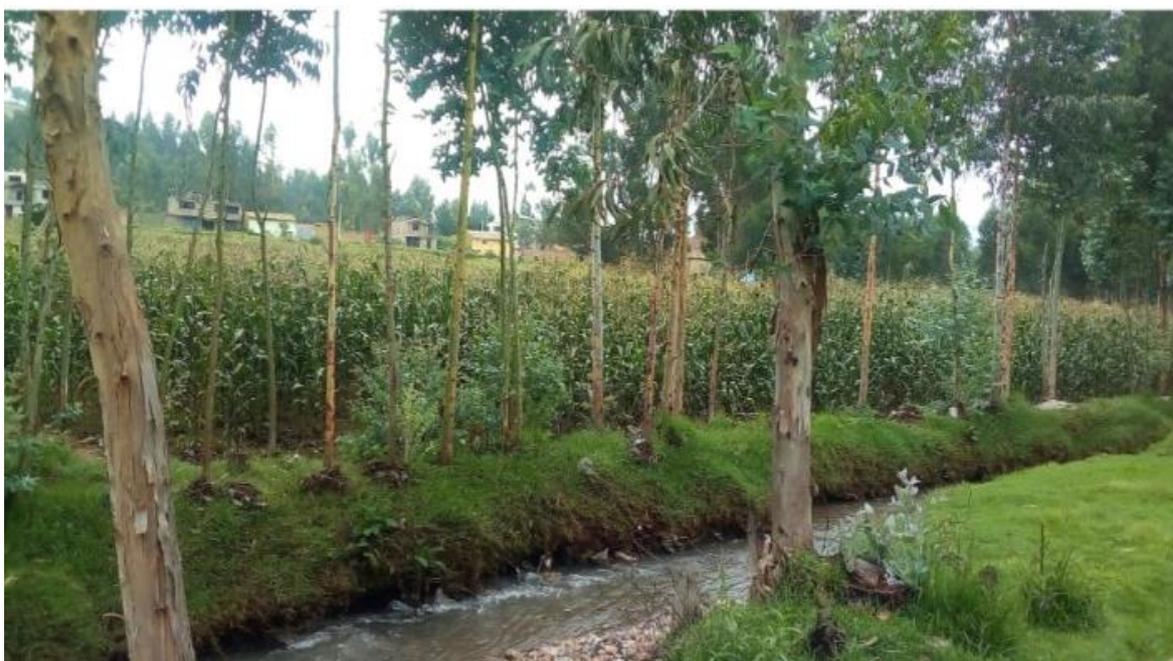


Figura 113: Cobertura vegetal – cultivos de maíz en la zona baja adyacente al río Anya.



Figura 114: Cobertura vegetal de la cuenca Anya – cultivos de papa y árboles de eucaliptos en las partes más altas de la cuenca. Al fondo, parte del “divortium aquarium”, suelo con características arcillosas.



Figura 115: Mira limnimétrica del río Anya. Nótese el tipo de flujo subcrítico del río.



Figura 116: Río Anya aguas debajo de la estación limnimétrica.



Figura 117: Cobertura vegetal de la cuenca Anya – cultivos de maíz, árboles de eucaliptos en zonas forestadas, trochas carrozables y viviendas de material noble dentro de la cuenca.



Figura 118: Mira limnimétrica ubicada en el río Mchique.



Figura 119: Cobertura vegetal de la cuenca Mchique.



Figura 120: Infraestructura existente en la cuenca Mchique.



Figura 121: Cobertura vegetal de la cuenca Mchique en la zona baja.



Figura 122: Cobertura vegetal de cultivo de maíz en la cuenca Mchique

Anexo 2: Datos de suelos – zona de estudio

(Tomados de otras tesis desarrolladas en la zona)

Localidad: Colpar- Quilcas

Latitud: 11.94° S

Longitud: 75.26° O

Altura: 3259 msnm

Tabla 140: Análisis de suelos – cuenca Anya

Parámetro	Unidad	Valor	Calificación
pH		5.69	Acido
CE	dS. m-1	0.52	No salino
CaCO ₃	g.kg-1	0	No calcáreo
MO	%	0.043	Bajo
N	g.kg-1	0.23	Bajo
NO ₃ -		30.77	
P		6.9	
K		88	
Arena	%	50	
Limo	%	30	
Arcilla	%	20	
Clase textural			Franco

FUENTE: Gutierrez, 2015.

Localidad: Aramachay - Sincos

Latitud: 11.92° S

Longitud: 75.38° O

Altura: 3837 msnm

Tabla 141: Análisis de suelos – cuenca Mchique

Parámetro	Unidad	Valor	Calificación
pH		4.95	Muy fuertemente ácido
CE	dS. Cm-1	0.48	No salino
CaCO ₃	g.kg-1	0	No calcáreo
MO	%	3	Moderado
N	g.kg-1	1.5	Moderado
P	mg.kg-1	45.2	Elevado
K	mg.kg-1	154	Bajo
Arena	%	46	
Limo	%	38	
Arcilla	%	16	
Clase textural			Franco

FUENTE: Campos, 2014.

Determinación de la conductividad hidráulica promedio de las cuencas con SPAW (Soil Plant Air and Water)

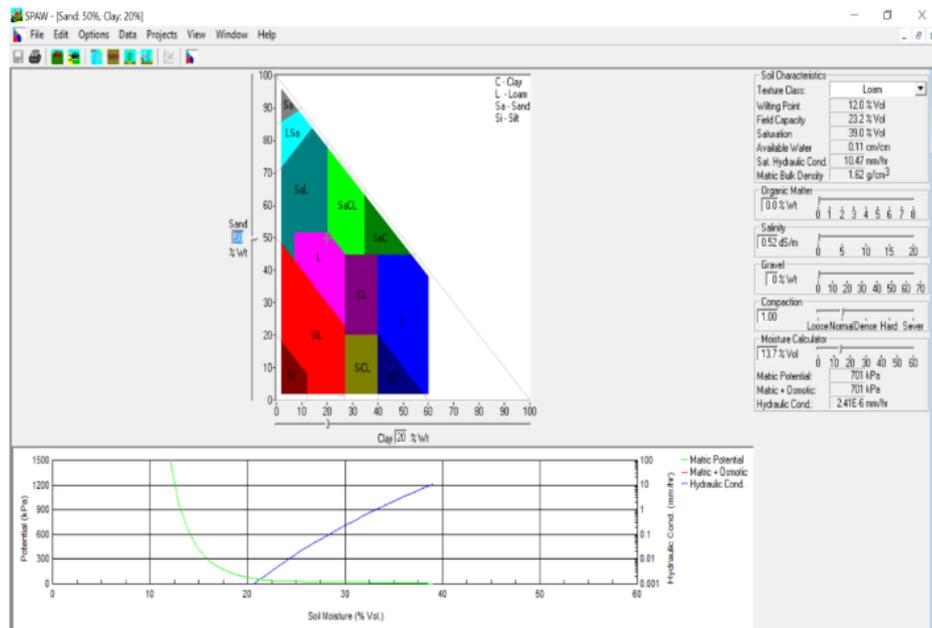


Figura 123: Salida de SPAW donde $K_{prom} = 10.47$ mm/h (cuena Anya)

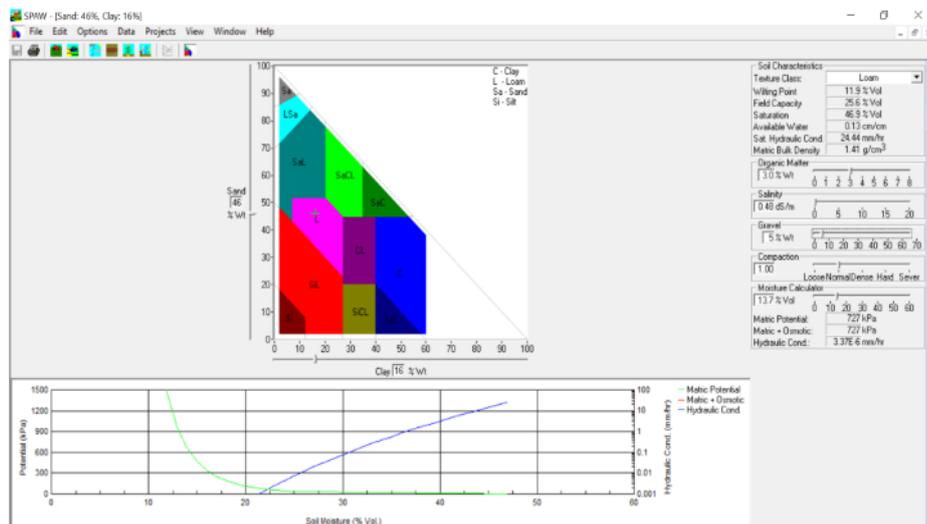


Figura 124: Salida de SPAW donde $K_{prom} = 24.44$ mm/h (cuena Mchique)

Anexo 3: Mapas de isoyetas mensuales – año 2014

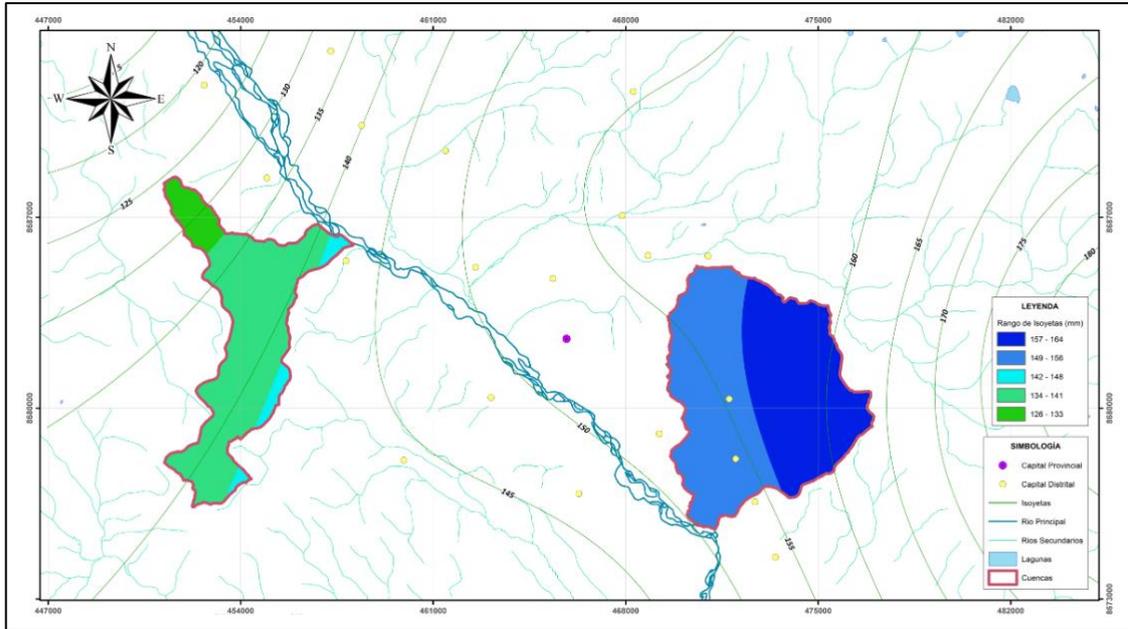


Figura 125: Mapa de precipitación mensual - enero 2014

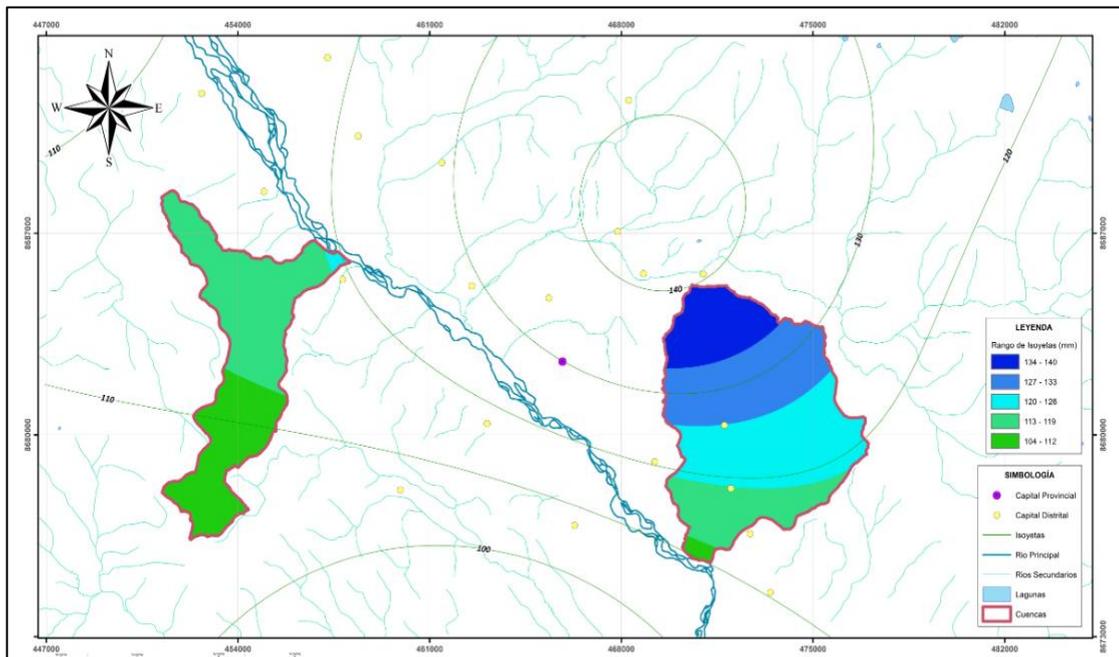


Figura 126: Mapa de precipitación mensual - febrero 2014

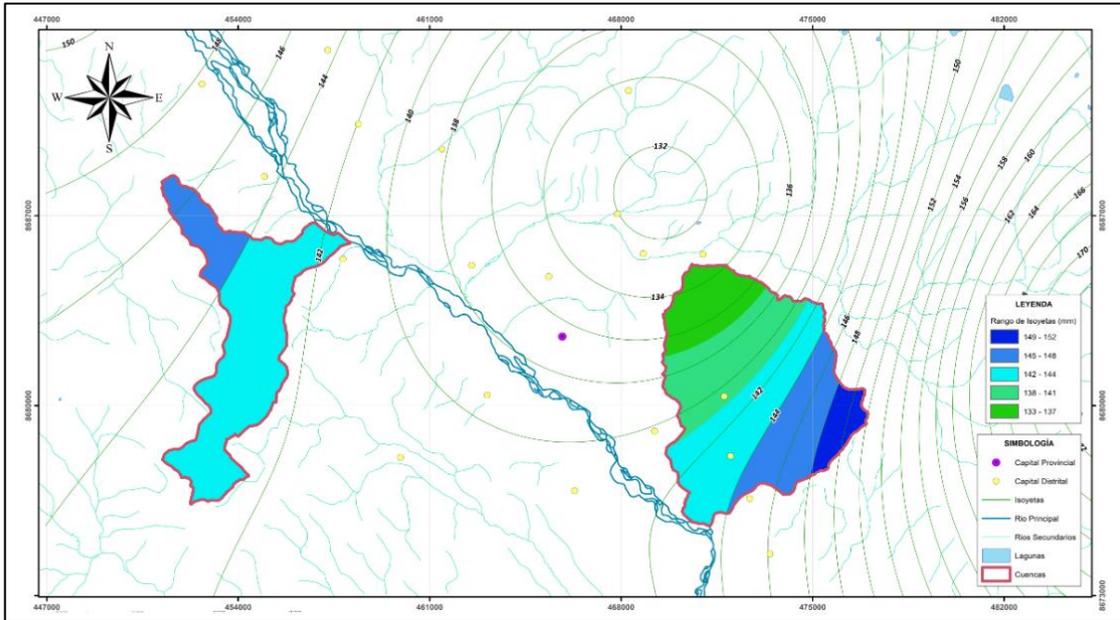


Figura 127: Mapa de precipitación mensual - marzo 2014

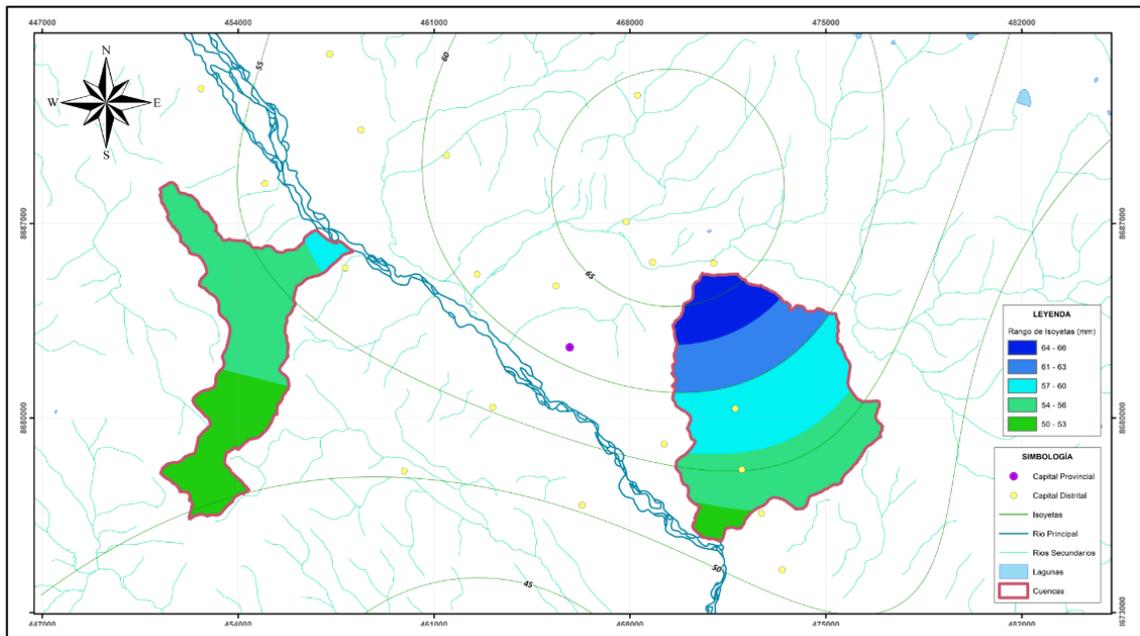


Figura 128: Mapa de precipitación mensual - abril 2014

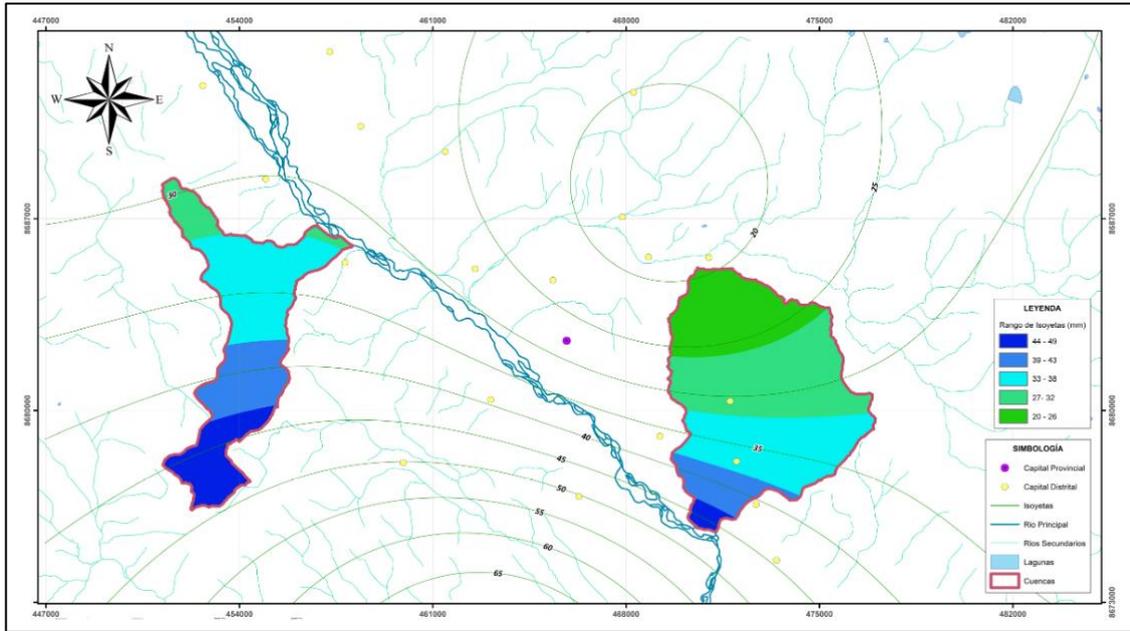


Figura 129: Mapa de precipitación mensual - mayo 2014

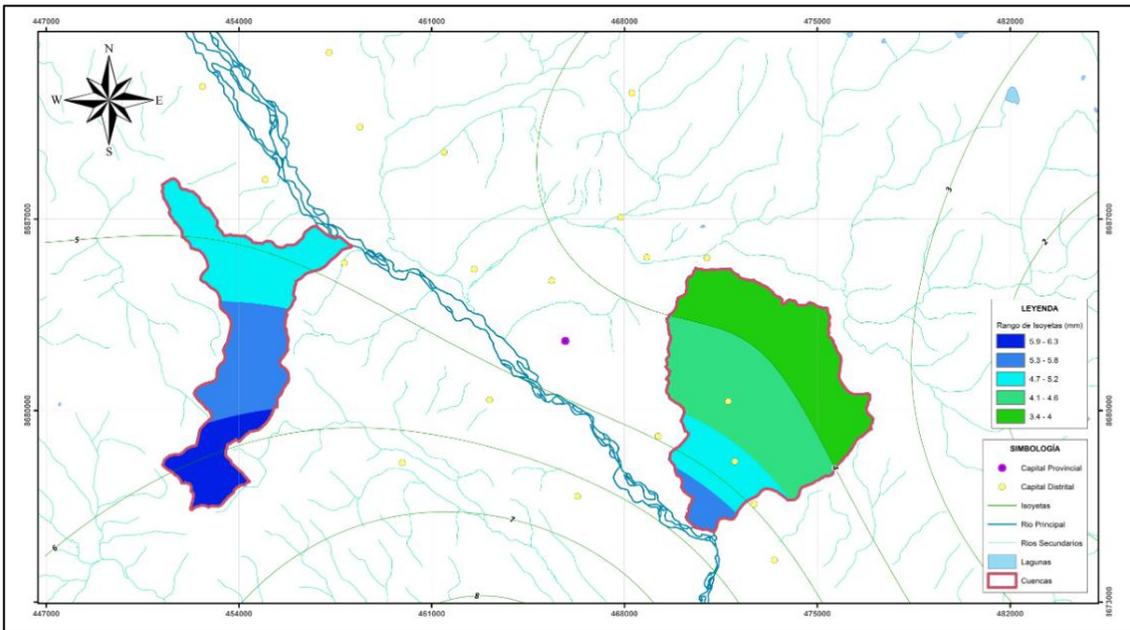


Figura 130: Mapa de precipitación mensual - junio 2014

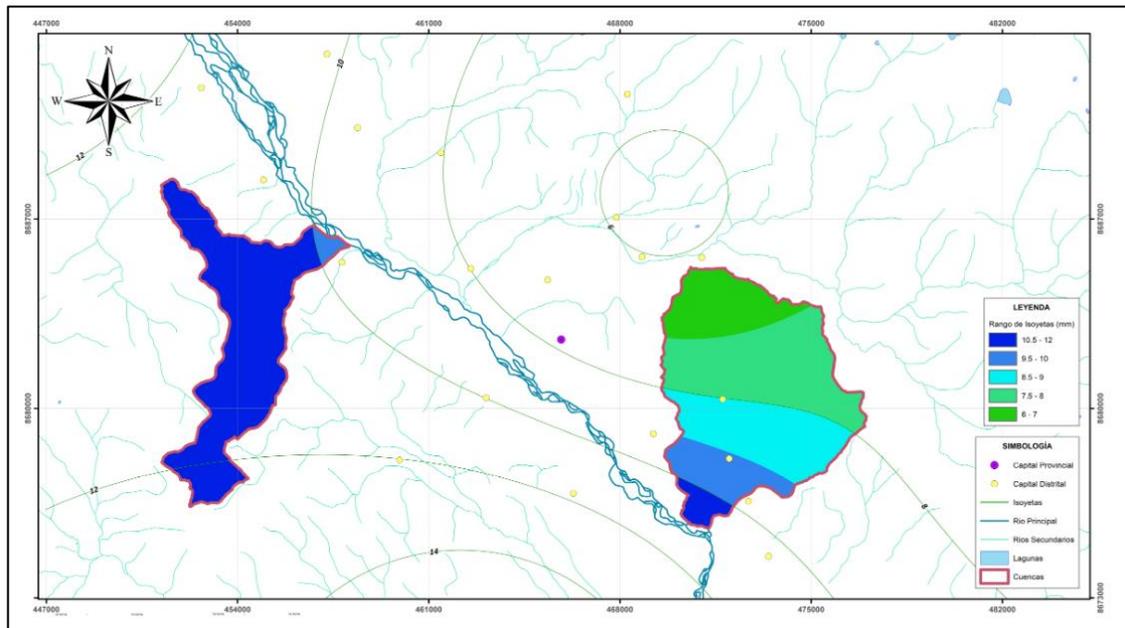


Figura 131: Mapa de precipitación mensual - julio 2014

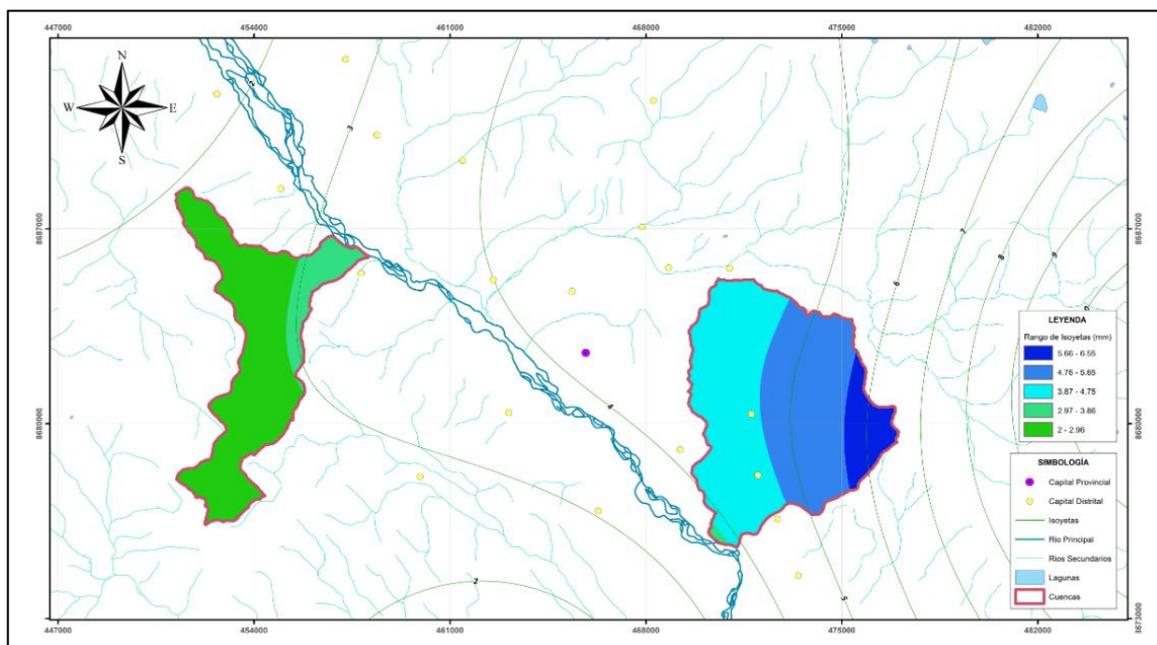


Figura 132: Mapa de precipitación mensual - agosto 2014

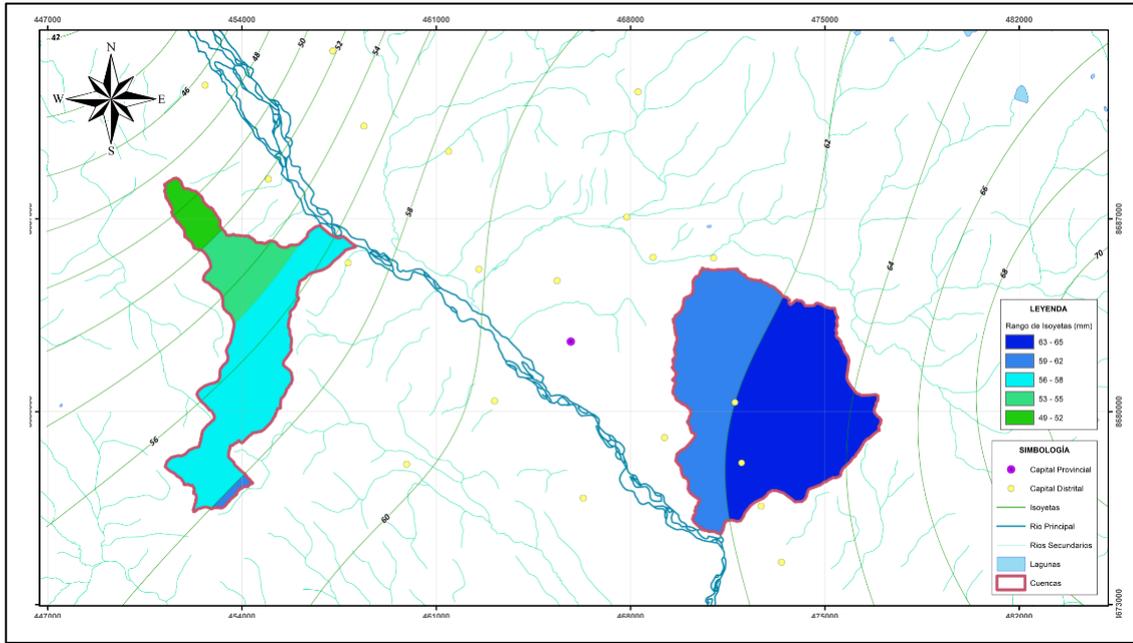


Figura 133: Mapa de precipitación mensual - setiembre 2014

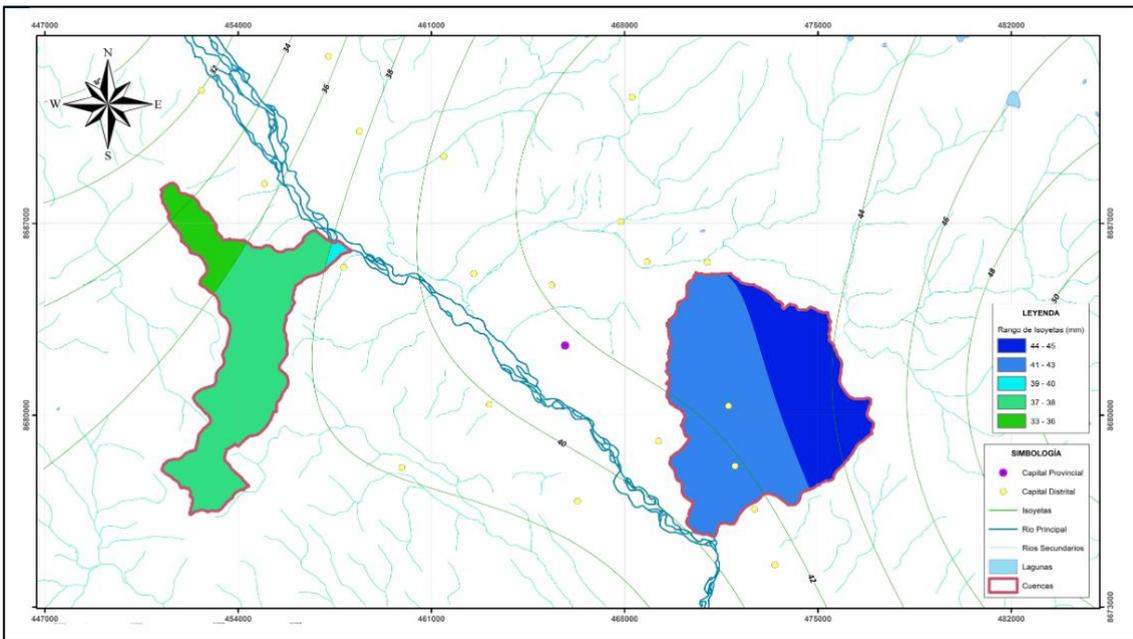


Figura 134: Mapa de precipitación mensual – octubre 2014

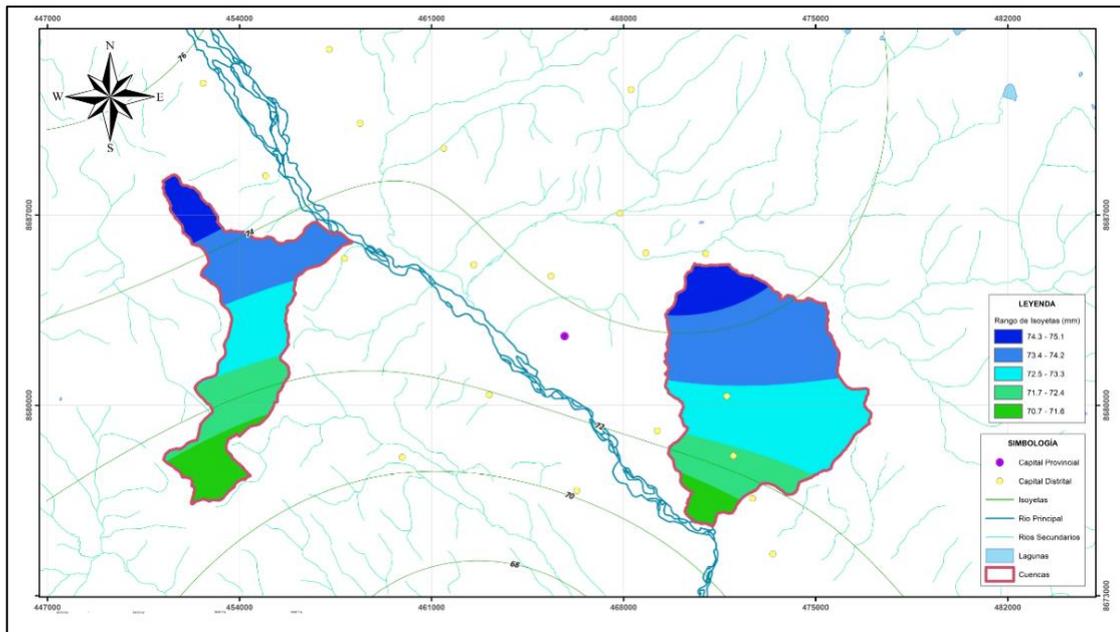


Figura 135: Mapa de precipitación mensual - noviembre 2014

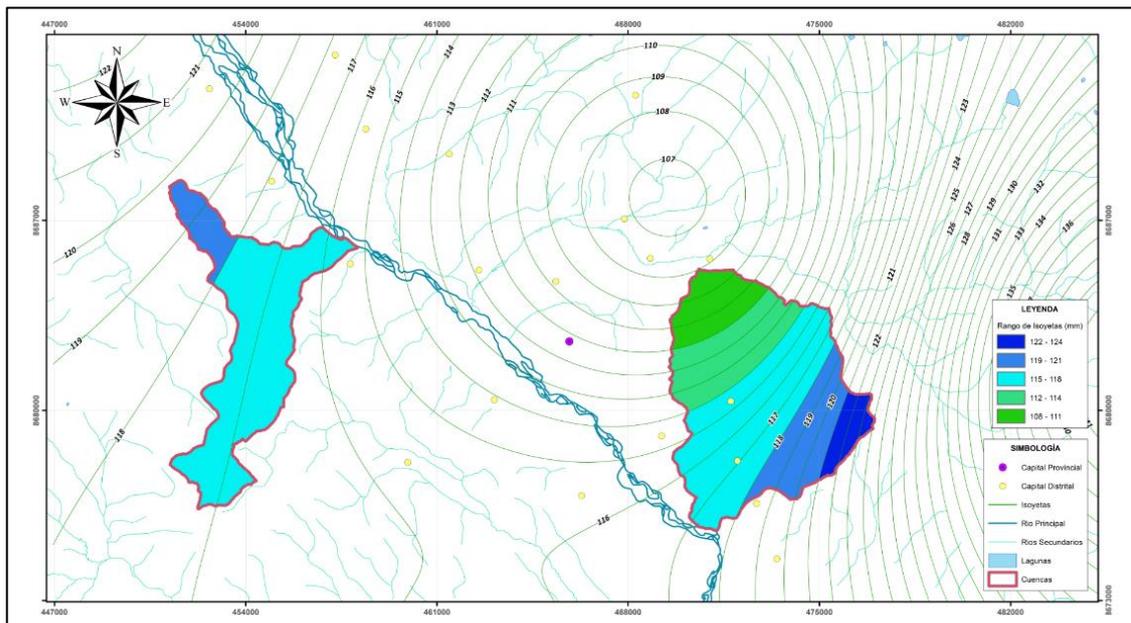


Figura 136: Mapa de precipitación mensual – diciembre 2014

Anexo 4: Cálculo de coeficiente de agotamiento

(Utilizado en el modelo Lutz Scholtz Modificado- LSM)

a) Cuenca Anya

Fecha	t	Q _t	Q ₀	a
2014/04/04	1	1.860	1.86	0.000000
2014/04/05	2	0.980		-0.003931
2014/04/06	3	0.900		-0.004454
2014/04/07	4	0.810		-0.005100
2014/04/08	5	0.810		-0.005100
2014/04/09	6	1.100		-0.003222
2014/04/10	7	0.810		-0.005100
2014/04/11	8	0.730		-0.005738
2014/04/12	9	0.730		-0.005738
2014/04/13	10	0.730		-0.005738
2014/04/14	11	0.730		-0.005738
2014/04/15	12	0.730		-0.005738
2014/04/16	13	0.650		-0.006450
2014/04/17	14	0.650		-0.006450
2014/04/18	15	0.580		-0.007149
2014/04/19	16	0.580		-0.007149
2014/04/20	17	0.520		-0.007819
2014/04/21	18	0.580		-0.007149
2014/04/22	19	0.520		-0.007819
2014/04/23	20	0.470		-0.008439
2014/04/24	21	0.520		-0.007819
2014/04/25	22	0.470		-0.008439
2014/04/26	23	0.470		-0.008439
2014/04/27	24	0.470		-0.008439
2014/04/28	25	0.420		-0.009129
2014/04/29	26	0.470		-0.008439
2014/04/30	27	0.810		-0.005100
2014/05/01	28	0.520		-0.007819
2014/05/02	29	0.810		-0.005100
2014/05/03	30	0.470		-0.008439
2014/05/04	31	0.520		-0.007819
2014/05/05	32	0.420		-0.009129
2014/05/06	33	0.520		-0.007819
2014/05/07	34	0.470		-0.008439
2014/05/08	35	0.420		-0.009129
2014/05/09	36	0.420		-0.009129
2014/05/10	37	0.470		-0.008439
2014/05/11	38	0.420		-0.009129
2014/05/12	39	0.420		-0.009129
2014/05/13	40	0.420		-0.009129
2014/05/14	41	0.420		-0.009129
2014/05/15	42	0.420		-0.009129
2014/05/16	43	0.378		-0.009776
2014/05/17	44	0.340		-0.010426

«continuación»

2014/05/18	45	0.340	-0.010426
2014/05/19	46	0.340	-0.010426
2014/05/20	47	0.340	-0.010426
2014/05/21	48	0.378	-0.009776
2014/05/22	49	0.378	-0.009776
2014/05/23	50	0.378	-0.009776
2014/05/24	51	0.378	-0.009776
2014/05/25	52	0.340	-0.010426
2014/05/26	53	0.300	-0.011194
2014/05/27	54	0.300	-0.011194
2014/05/28	55	0.300	-0.011194
2014/05/29	56	0.300	-0.011194
2014/05/30	57	0.300	-0.011194
2014/05/31	58	0.300	-0.011194
2014/06/01	59	0.300	-0.011194
2014/06/02	60	0.300	-0.011194
2014/06/03	61	0.251	-0.012288
2014/06/04	62	0.251	-0.012288
2014/06/05	63	0.251	-0.012288
2014/06/06	64	0.251	-0.012288
2014/06/07	65	0.205	-0.013530
2014/06/08	66	0.205	-0.013530
2014/06/09	67	0.205	-0.013530
2014/06/10	68	0.205	-0.013530
2014/06/11	69	0.205	-0.013530
2014/06/12	70	0.300	-0.011194
2014/06/13	71	0.300	-0.011194
2014/06/14	72	0.300	-0.011194
2014/06/15	73	0.300	-0.011194
2014/06/16	74	0.340	-0.010426
2014/06/17	75	0.340	-0.010426
2014/06/18	76	0.300	-0.011194
2014/06/19	77	0.340	-0.010426
2014/06/20	78	0.300	-0.011194
2014/06/21	79	0.300	-0.011194
2014/06/22	80	0.251	-0.012288
2014/06/23	81	0.251	-0.012288
2014/06/24	82	0.251	-0.012288
2014/06/25	83	0.300	-0.011194
2014/06/26	84	0.300	-0.011194
2014/06/27	85	0.300	-0.011194
2014/06/28	86	0.251	-0.012288
2014/06/29	87	0.251	-0.012288
2014/06/30	88	0.251	-0.012288
2014/07/01	89	0.251	-0.012288
2014/07/02	90	0.251	-0.012288
2014/07/03	91	0.300	-0.011194
2014/07/04	92	0.251	-0.012288
2014/07/05	93	0.251	-0.012288
2014/07/06	94	0.205	-0.013530
2014/07/07	95	0.251	-0.012288

«continuación»

2014/07/08	96	0.205	-0.013530
2014/07/09	97	0.205	-0.013530
2014/07/10	98	0.251	-0.012288
2014/07/11	99	0.205	-0.013530
2014/07/12	100	0.205	-0.013530
2014/07/13	101	0.251	-0.012288
2014/07/14	102	0.205	-0.013530
2014/07/15	103	0.205	-0.013530
2014/07/16	104	0.205	-0.013530
2014/07/17	105	0.205	-0.013530
2014/07/18	106	0.251	-0.012288
2014/07/19	107	0.251	-0.012288
2014/07/20	108	0.300	-0.011194
2014/07/21	109	0.300	-0.011194
2014/07/22	110	0.300	-0.011194
2014/07/23	111	0.251	-0.012288
2014/07/24	112	0.251	-0.012288
2014/07/25	113	0.300	-0.011194
2014/07/26	114	0.300	-0.011194
2014/07/27	115	0.340	-0.010426
2014/07/28	116	0.251	-0.012288
2014/07/29	117	0.205	-0.013530
2014/07/30	118	0.251	-0.012288
2014/07/31	119	0.251	-0.012288
2014/08/01	120	0.251	-0.012288
2014/08/02	121	0.205	-0.013530
2014/08/03	122	0.205	-0.013530
2014/08/04	123	0.205	-0.013530
2014/08/05	124	0.205	-0.013530
2014/08/06	125	0.251	-0.012288
2014/08/07	126	0.205	-0.013530
2014/08/08	127	0.205	-0.013530
2014/08/09	128	0.205	-0.013530
2014/08/10	129	0.251	-0.012288
2014/08/11	130	0.251	-0.012288
2014/08/12	131	0.251	-0.012288
2014/08/13	132	0.205	-0.013530
2014/08/14	133	0.205	-0.013530
2014/08/15	134	0.205	-0.013530
2014/08/16	135	0.205	-0.013530
2014/08/17	136	0.205	-0.013530
2014/08/18	137	0.205	-0.013530
2014/08/19	138	0.175	-0.014500
2014/08/20	139	0.175	-0.014500
2014/08/21	140	0.205	-0.013530
2014/08/22	141	0.205	-0.013530
2014/08/23	142	0.205	-0.013530
2014/08/24	143	0.205	-0.013530
2014/08/25	144	0.205	-0.013530
2014/08/26	145	0.205	-0.013530
2014/08/27	146	0.205	-0.013530

«continuación»

2014/08/28	147	0.205	-0.013530
2014/08/29	148	0.205	-0.013530
2014/08/30	149	0.205	-0.013530
2014/08/31	150	0.205	-0.013530
2014/09/01	151	0.205	-0.013530
2014/09/02	152	0.205	-0.013530
2014/09/03	153	0.205	-0.013530
2014/09/04	154	0.205	-0.013530
2014/09/05	155	0.205	-0.013530
2014/09/06	156	0.175	-0.014500
2014/09/07	157	0.205	-0.013530
2014/09/08	158	0.175	-0.014500
2014/09/09	159	0.205	-0.013530
2014/09/10	160	0.205	-0.013530
2014/09/11	161	0.205	-0.013530
2014/09/12	162	0.205	-0.013530
2014/09/13	163	0.205	-0.013530
PROMEDIO=			-0.011036

Anexo 5: Cálculo de coeficiente de agotamiento

(Utilizado en el modelo LSM)

b) Cuenca Mchique

Fecha	t	Q _t	Q ₀	a
2014/03/05	1	0.365	0.37	0.000000
2014/03/06	2	0.351		-0.000407
2014/03/07	3	0.337		-0.000831
2014/03/08	4	0.351		-0.000407
2014/03/09	5	0.351		-0.000407
2014/03/10	6	0.344		-0.000617
2014/03/11	7	0.337		-0.000831
2014/03/12	8	0.337		-0.000831
2014/03/13	9	0.38		0.000420
2014/03/14	10	0.372		0.000198
2014/03/15	11	0.38		0.000420
2014/03/16	12	0.372		0.000198
2014/03/17	13	0.395		0.000823
2014/03/18	14	0.38		0.000420
2014/03/19	15	0.365		0.000000
2014/03/20	16	0.365		0.000000
2014/03/21	17	0.363		-0.000057
2014/03/22	18	0.36		-0.000144
2014/03/23	19	0.330		-0.001050
2014/03/24	20	0.337		-0.000831
2014/03/25	21	0.321		-0.001338
2014/03/26	22	0.315		-0.001535
2014/03/27	23	0.315		-0.001535
2014/03/28	24	0.315		-0.001535
2014/03/29	25	0.3		-0.002043
2014/03/30	26	0.3		-0.002043
2014/03/31	27	0.3		-0.002043
2014/04/01	28	0.30		-0.002148
2014/04/02	29	0.30		-0.002148
2014/04/03	30	0.30		-0.002148
2014/04/04	31	0.31		-0.001837
2014/04/05	32	0.32		-0.001535
2014/04/06	33	0.31		-0.001837
2014/04/07	34	0.30		-0.002148
2014/04/08	35	0.30		-0.002148
2014/04/09	36	0.32		-0.001241
2014/04/10	37	0.32		-0.001241
2014/04/11	38	0.31		-0.001837
2014/04/12	39	0.30		-0.002148
2014/04/13	40	0.29		-0.002432
2014/04/14	41	0.30		-0.002148
2014/04/15	42	0.30		-0.002148
2014/04/16	43	0.30		-0.002148
2014/04/17	44	0.29		-0.002432

«continuación»

2014/04/18	45	0.29	-0.002432
2014/04/19	46	0.29	-0.002432
2014/04/20	47	0.29	-0.002432
2014/04/21	48	0.29	-0.002432
2014/04/22	49	0.29	-0.002432
2014/04/23	50	0.29	-0.002432
2014/04/24	51	0.30	-0.002148
2014/04/25	52	0.29	-0.002432
2014/04/26	53	0.28	-0.002614
2014/04/27	54	0.28	-0.002614
2014/04/28	55	0.28	-0.002614
2014/04/29	56	0.28	-0.002614
2014/04/30	57	0.30	-0.002043
2014/05/01	58	0.286	-0.002541
2014/05/02	59	0.286	-0.002541
2014/05/03	60	0.28	-0.002762
2014/05/04	61	0.291	-0.002360
2014/05/05	62	0.291	-0.002360
2014/05/06	63	0.291	-0.002360
2014/05/07	64	0.291	-0.002360
2014/05/08	65	0.291	-0.002360
2014/05/09	66	0.286	-0.002541
2014/05/10	67	0.286	-0.002541
2014/05/11	68	0.291	-0.002360
2014/05/12	69	0.286	-0.002541
2014/05/13	70	0.286	-0.002541
2014/05/14	71	0.286	-0.002541
2014/05/15	72	0.286	-0.002541
2014/05/16	73	0.286	-0.002541
2014/05/17	74	0.286	-0.002541
2014/05/18	75	0.286	-0.002541
2014/05/19	76	0.286	-0.002541
2014/05/20	77	0.280	-0.002762
2014/05/21	78	0.274	-0.002987
2014/05/22	79	0.267	-0.003257
2014/05/23	80	0.267	-0.003257
2014/05/24	81	0.260	-0.003533
2014/05/25	82	0.260	-0.003533
2014/05/26	83	0.260	-0.003533
2014/05/27	84	0.245	-0.004152
2014/05/28	85	0.245	-0.004152
2014/05/29	86	0.245	-0.004152
2014/05/30	87	0.245	-0.004152
2014/05/31	88	0.245	-0.004152
2014/06/01	89	0.228	-0.004902
2014/06/02	90	0.235	-0.004587
2014/06/03	91	0.245	-0.004152
2014/06/04	92	0.235	-0.004587
2014/06/05	93	0.235	-0.004587
2014/06/06	94	0.235	-0.004587

«continuación»

2014/06/07	95	0.235	-0.004587
2014/06/08	96	0.228	-0.004902
<hr/>			
			PROM. -0.002180

Anexo 6: Series generadas con el modelo Lutz Scholtz- cuenca Anya

LUTZ SHOLTZ CUENCA ANYA (Ce=0.47)

$$Q_t = 2.089 + 0.3813(Q_{t-1}) + 0.5469(PE_t) + 0.1378(z)$$

Mes	Qt (mm)	Qt-1 (mm)	PEt (mm)
Ene	57.4	43.4	72.4
Feb	69.6	57.4	84.6
Mar	64.5	69.6	67.0
Abr	36.5	64.5	12.9
May	15.8	36.5	3.1
Jun	8.1	15.8	1.2
Jul	4.5	8.1	0.8
Ago	4.5	4.5	2.5
Set	7.3	4.5	6.3
Oct	17.5	7.3	17.5
Nov	19.5	17.5	22.0
Dic	43.4	19.5	58.4
Suma	348.7	348.7	348.7

Mes	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Promedio
Ene	58.2	58.2	57.9	58.2	58.2	58.0	58.3	58.2	58.1	58.3	58.2
Feb	70.2	70.1	70.3	70.3	70.2	70.2	70.2	70.1	70.2	70.2	70.2
Mar	65.3	65.2	65.3	65.4	65.4	65.4	65.2	65.3	65.3	65.2	65.3
Abr	33.6	33.5	33.6	33.9	33.5	33.6	33.9	33.8	33.8	33.7	33.7
May	17.9	17.6	17.8	17.7	17.6	17.7	17.9	17.7	17.9	17.7	17.7
Jun	8.7	8.8	8.9	8.8	8.8	8.6	8.8	8.8	8.9	8.8	8.8
Jul	5.8	5.7	5.9	5.5	5.8	5.6	5.6	5.6	5.5	5.7	5.7
Ago	5.4	5.1	5.0	5.1	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.2	5.2
Set	7.4	7.0	7.4	7.0	7.6	7.3	7.3	7.2	7.3	6.9	7.2
Oct	14.3	14.3	14.3	14.6	14.4	14.5	14.5	14.6	14.4	14.5	14.4
Nov	20.7	20.7	20.9	20.6	21.0	20.6	20.8	21.0	20.8	20.8	20.8
Dic	41.5	41.3	41.3	41.2	41.5	41.4	41.6	41.3	41.6	41.5	41.4
Suma	349.0	347.5	348.6	348.2	349.2	348.2	349.3	348.7	348.8	348.5	348.6
Promedio	29.1	29.0	29.0	29.0	29.1	29.0	29.1	29.1	29.1	29.0	
Desv. Est.	24.2	24.2	24.1	24.3	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	
CV	83%	84%	83%	84%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	

Números aleatorios con Distribución Normal Estándar Z (0,1)

1	0.4187	0.5065	0.0143	0.3159	0.3005	0.0762	0.7784	0.4891	0.2142	0.6682
2	0.4680	0.1746	0.5978	0.6166	0.3380	0.4683	0.3887	0.1233	0.4529	0.4623
3	0.6719	0.3260	0.5106	0.9028	0.8511	0.8762	0.2498	0.5744	0.7276	0.4060
4	0.1430	0.0642	0.1165	0.8223	0.0842	0.1532	0.8532	0.7640	0.6099	0.2788
5	0.8395	0.1361	0.7523	0.3970	0.3068	0.4168	0.9396	0.3817	0.8427	0.4901
6	0.2585	0.3972	0.7221	0.4000	0.4200	0.0533	0.4818	0.6288	0.7296	0.4535
7	0.9305	0.6448	0.9740	0.1980	0.8416	0.4659	0.4542	0.3427	0.1711	0.7825
8	0.9642	0.2031	0.1512	0.2910	0.5581	0.6917	0.4980	0.3987	0.2697	0.5274
9	0.9053	0.0715	0.9041	0.0430	0.9932	0.6132	0.6461	0.4402	0.6066	0.0176
10	0.1061	0.0893	0.1269	0.8699	0.2877	0.7090	0.6705	0.7762	0.2682	0.5514
11	0.2974	0.3359	0.8592	0.0668	0.9671	0.0937	0.5911	0.9065	0.6688	0.4670
12	0.6027	0.1430	0.1406	0.0528	0.6649	0.3129	0.8139	0.1680	0.8026	0.6052

Anexo 7: Series generadas con el modelo Lutz Scholtz Modificado – cuenca Anya

$$Q_t = 4.0107 + 0.2874(Q_{t-1}) + 0.5868(PE_t) + 0.8305(z)$$

Mes	Qt (mm)	Qt-1 (mm)	PEt (mm)
Ene	55.72	41.04	60.7
Feb	69.04	55.72	99.0
Mar	79.89	69.04	84.9
Abr	44.08	79.89	27.7
May	13.24	44.08	1.5
Jun	14.75	13.24	6.3
Jul	13.12	14.75	7.1
Ago	8.38	13.12	4.0
Set	3.19	8.38	0.1
Oct	17.85	3.19	17.9
Nov	22.37	17.85	22.4
Dic	41.04	22.37	51.0
Suma	382.67	382.67	382.67

Mes	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Promedio
Ene	51.9	51.7	51.7	52.0	51.9	51.9	51.9	52.2	51.6	52.0	53.0
Feb	78.1	78.2	78.4	78.7	78.6	78.4	78.8	78.9	78.2	78.4	81.0
Mar	74.1	73.8	74.1	74.2	74.4	74.2	73.7	74.3	73.8	74.1	75.4
Abr	43.3	43.4	43.8	43.8	43.5	43.6	43.9	43.3	44.0	43.5	41.6
May	18.2	17.7	18.0	17.9	17.9	18.4	18.1	17.9	17.8	18.3	16.0
Jun	12.2	12.0	12.1	11.9	12.1	11.7	11.8	11.6	11.8	11.6	11.3
Jul	12.7	12.7	13.0	12.7	12.6	13.0	12.5	12.6	12.9	13.0	12.0
Ago	10.7	10.4	10.4	10.4	10.7	10.2	10.7	10.5	10.6	10.4	9.7
Set	6.9	6.6	6.6	6.8	7.3	7.1	6.6	6.8	7.2	6.6	6.0
Oct	16.1	15.9	15.9	15.8	16.0	15.8	15.7	15.4	16.2	15.8	16.1
Nov	22.3	22.9	22.5	22.7	22.5	22.7	22.8	22.4	22.7	22.7	22.6
Dic	41.1	40.6	41.1	40.9	40.9	41.1	41.1	40.8	40.8	40.5	42.2
Suma	387.5	385.9	387.7	387.9	388.1	388.0	387.7	386.7	387.6	386.9	387.0
Prom.	32.3	32.2	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	32.2	32.3	32.2	32.2
Desv.	25.0	25.1	25.1	25.2	25.2	25.1	25.2	25.3	25.0	25.1	26.2
CV	77%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	79%	77%	78%	81%

Números aleatorios con Distribución Normal Estándar Z (0,1)

1	0.4992	0.2766	0.3702	0.6481	0.5126	0.5202	0.6153	0.8791	0.2106	0.6927
2	0.0002	0.0690	0.3691	0.6847	0.5043	0.3084	0.7376	0.8763	0.1019	0.2862
3	0.4701	0.2047	0.5028	0.6938	0.8884	0.6616	0.0739	0.7082	0.2166	0.5813
4	0.0304	0.1268	0.6530	0.6919	0.2513	0.3867	0.8360	0.0584	0.8953	0.2574
5	0.8116	0.1631	0.4971	0.3986	0.3997	0.9997	0.6627	0.4576	0.3046	0.9106
6	0.7853	0.5269	0.7272	0.4955	0.6424	0.2315	0.3383	0.0962	0.2709	0.0955
7	0.3551	0.4133	0.7028	0.3167	0.2018	0.6924	0.1179	0.2848	0.6168	0.7457
8	0.6660	0.3003	0.3165	0.3329	0.6473	0.1050	0.6480	0.3668	0.5128	0.3298
9	0.5125	0.1924	0.1340	0.4054	0.9684	0.7565	0.1326	0.4022	0.8523	0.1295
10	0.8379	0.5557	0.6150	0.4786	0.6794	0.4288	0.4141	0.0240	0.9478	0.4621
11	0.0288	0.8145	0.3313	0.5103	0.2556	0.5331	0.6754	0.1562	0.5237	0.5381
12	0.8435	0.2910	0.8696	0.6738	0.6548	0.8408	0.8212	0.5184	0.5035	0.0834

Anexo 8: Variación temporal de humedad del suelo

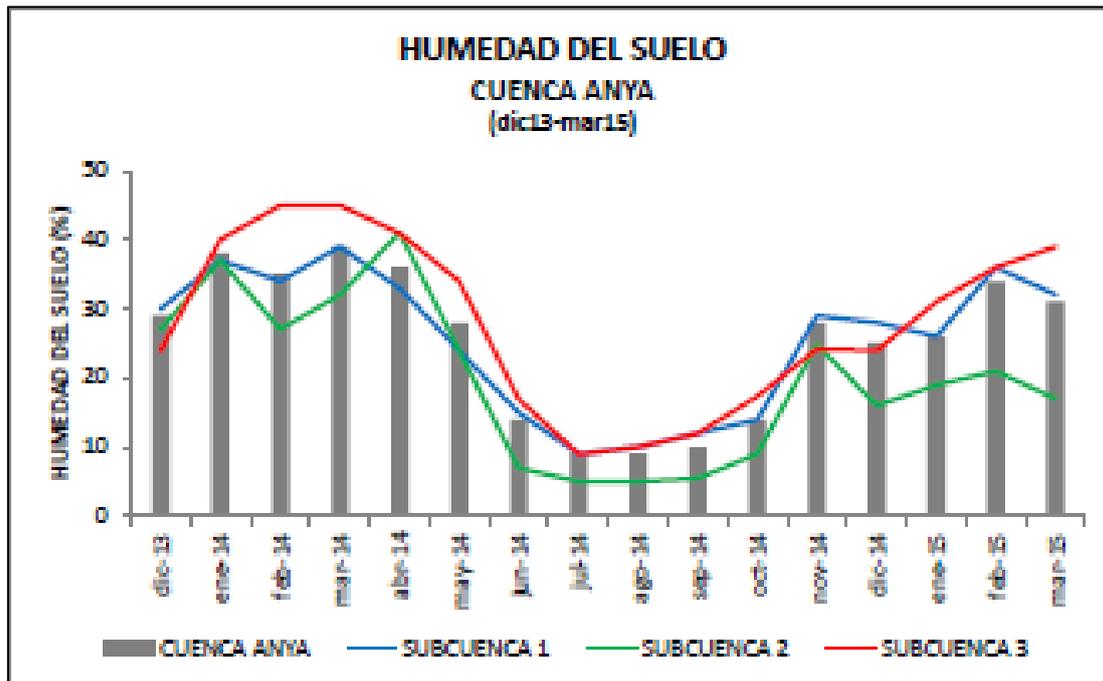


Figura 137: Serie temporal de la humedad del suelo de la cuenca Anya

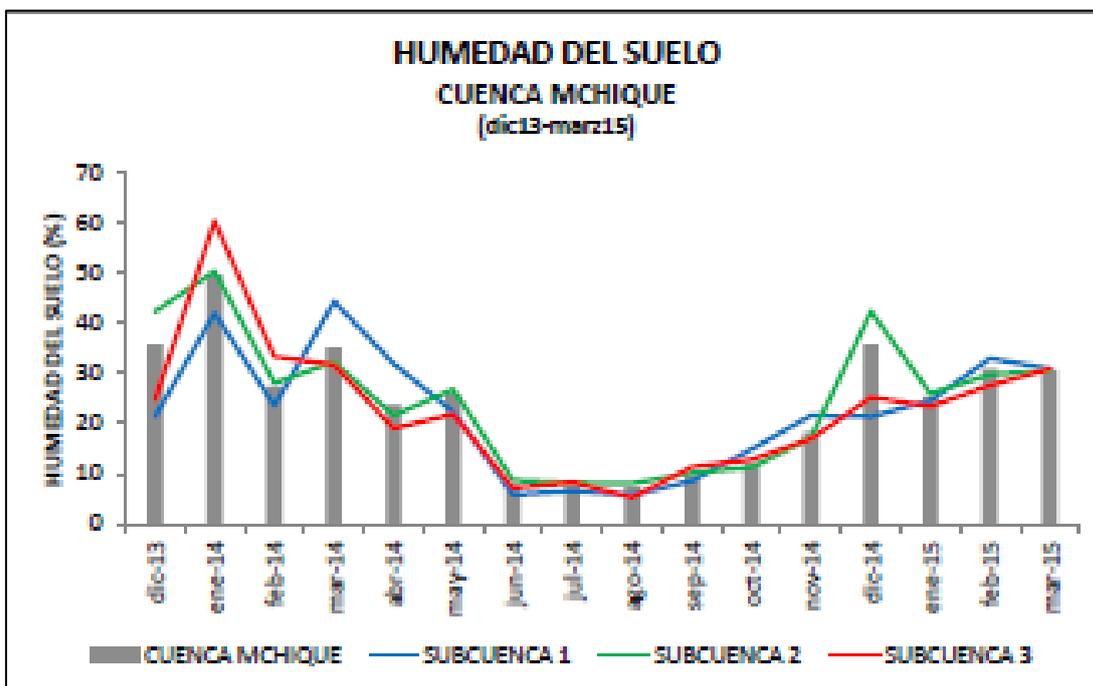


Figura 138: Serie temporal de la humedad del suelo de la cuenca Mchique

FUENTE: Camones, 2015.

Anexo 9: Factura de compra de imagen satelital

ORIONDATA-I Imágenes, Estadísticas & GeoTecnologías		30 de octubre 2020
FACTURA PROFORMA Número: 20201030101		
Comprador		
Samuel Del Aguila Rios Ingeniero Geógrafo - Especialista SIG Tel: +51 - 993 - 189161		
Descripción		
SUMINISTRO DE PRODUCTO GEO TECNOLÓGICO PROCESADO EN BASE A: • Cobertura satelital 3m con Sept. & Oct. 2019		
VALOR DE LA PRESENTE FACTURA : \$620.00USD Valores Netos expresados en Dolares (USD) Venta exenta.		
PAGO POR TRANSFERENCIA BANCARIA INTERNACIONAL EN DOLARES Nombre: Oriondata Internacional SpA. RUT: 76.425.993-9 Cuenta N°: 5-800-11540-00 Código SWIFT / Swift Code: BCHICLRM Banco / Bank: BANCO DE CHILE Sucursal / Branch: AHUMADA N° 251, Santiago, CHILE Los costos de Transferencia son de responsabilidad del cliente		
Oscar Letelier CEO ORIONDATA		
José Joaquín Pérez n° 918, San Bernardo, Región Metropolitana, CHILE www.oriondata-i.com		

ORIONDATA-I Imágenes, Estadísticas & GeoTecnologías		30 de octubre 2020
FACTURA PROFORMA Número: 20201030102		
Comprador		
Samuel Del Aguila Rios Ingeniero Geógrafo - Especialista SIG Tel: +51 - 993 - 189161		
Descripción		
SUMINISTRO DE PRODUCTO GEO TECNOLÓGICO PROCESADO EN BASE A: • Cobertura satelital 3m con Sept. & Oct. 2019		
VALOR DE LA PRESENTE FACTURA : \$15.00USD Valores Netos expresados en Dolares (USD) Venta exenta.		
PAGO POR TRANSFERENCIA BANCARIA INTERNACIONAL EN DOLARES Nombre: Oriondata Internacional SpA. RUT: 76.425.993-9 Cuenta N°: 5-800-11540-00 Código SWIFT / Swift Code: BCHICLRM Banco / Bank: BANCO DE CHILE Sucursal / Branch: AHUMADA N° 251, Santiago, CHILE Los costos de Transferencia son de responsabilidad del cliente		
Oscar Letelier CEO ORIONDATA		
José Joaquín Pérez n° 918, San Bernardo, Región Metropolitana, CHILE www.oriondata-i.com		

Figura 139: Factura electrónica – compra de la imagen satelital

Anexo 10: Modelo de vulnerabilidad socioeconómica (VSCE) de las cuencas Anya y Mchique

a) Valoración de las unidades de las variables

Tabla de valoración de vulnerabilidad SCE según Índice de Desarrollo Humano

Rango de IDH	Valoración
< 0.35	5
0.35 - 0.40	4
0.40 - 0.50	3
0.50 - 0.54	2
> 0.54	1

Tabla de valoración de vulnerabilidad SCE según densidad poblacional

Densidad poblacional	Rango (hab./ha)	Valoración
Muy Alta	>150	5
Alta	100-150	4
Media	50-100	3
Baja	10-50	2
Muy Baja	<10	1

Tabla de valoración de vulnerabilidad SCE según Categoría del Centro de Salud

Categoría del Centro de Salud	Descripción	Valoración
I-1	Puesto de Salud	5
I-2	Puesto de Salud con médico	4
I-3	Centro de Salud con internamiento	3
I-4	Centro de Salud sin internamiento	2
I-5	Hospital I	1

Tabla de valoración de vulnerabilidad SCE según porcentaje de población que no cuenta con el servicio

Serv. básicos (agua, desague y elect.)(%)	Valoración
80-100%	5
60-80%	4
40-60%	3
20-40%	2
0-20%	1

Tabla de valoración de vulnerabilidad SCE según tipo de IE

Nivel de Centro Educativo	Valoración
Inicial	5
Inicial y Primaria	3
Inicial, Primaria y Secundaria	1

b) Formulación de los submodelos

Sub modelo de Unidades sociales (SMUS) =

$$SMUS = 0.2(\text{Demografía}) + 0.2(\text{IDH}) + 0.2(\text{S. Agua}) + 0.2(\text{S. Des.}) + 0.2(\text{S. Elec.})$$

Sub modelo de Infraestructura social (SMIS) =

$$SMIS = 0.4(\text{Vías}) + 0.3(\text{IIEE}) + 0.3(\text{Centros de Salud})$$

c) Integración ponderativa de submodelos – modelo de vulnerabilidad social

$$MVS = f(SMUS, SMIS)$$

$$MVS = 0.50 (SMUS) + 0.50 (SMIS)$$

Donde:

MVS: Modelo de Vulnerabilidad Social

SMUS: Submodelo de Unidades Sociales

SMIS: Submodelo de Infraestructura Social

d) Temáticos de la cuenca Anya y Mchique utilizados para el modelo de vulnerabilidad social

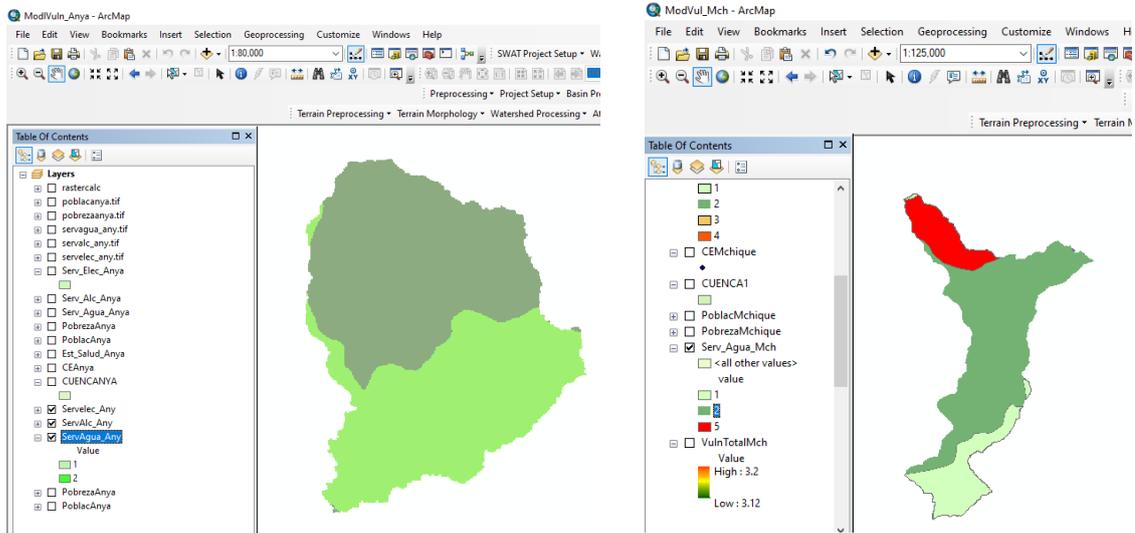


Figura 140: Mapas de servicio de agua de las cuencas Anya y Mchique

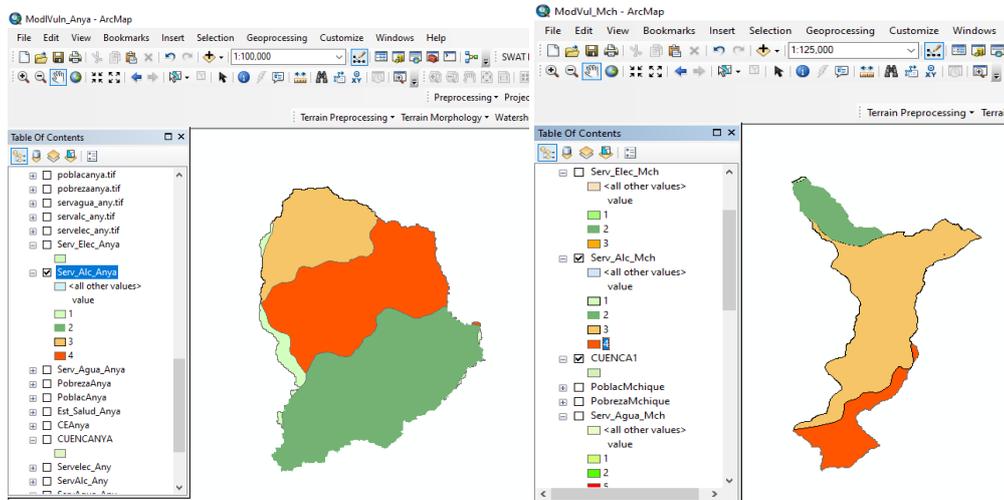


Figura 141: Mapa de servicio de alcantarillado - cuencas Anya y Mchique

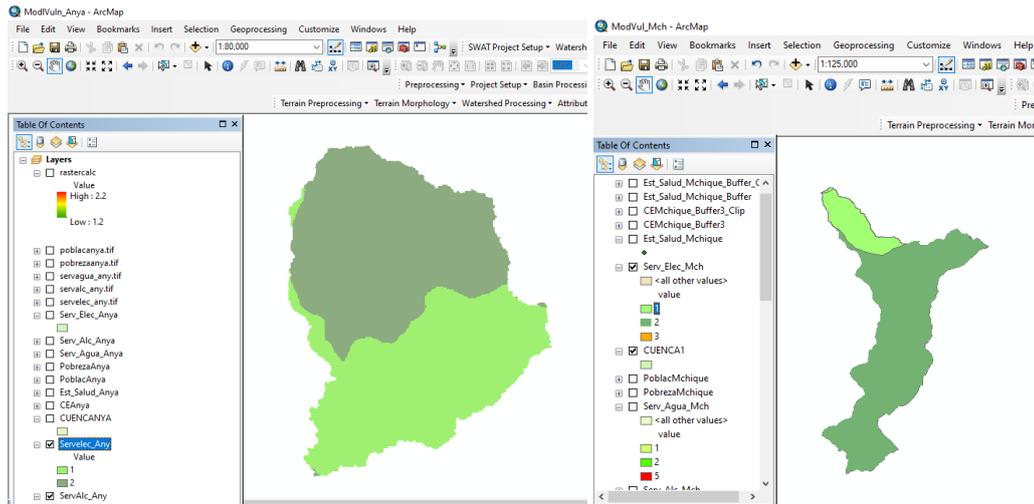


Figura 142: Mapa de servicio de electricidad - cuencas Anya y Mchique

e) Temáticos del submodelo de Infraestructura Social

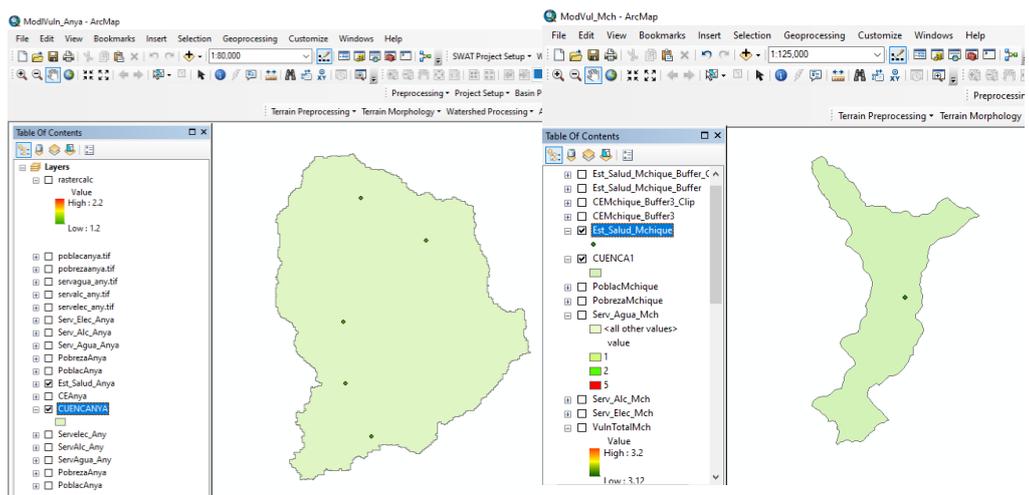


Figura 143: Ubicación de las Postas de Salud de las cuencas Anya y Mchique

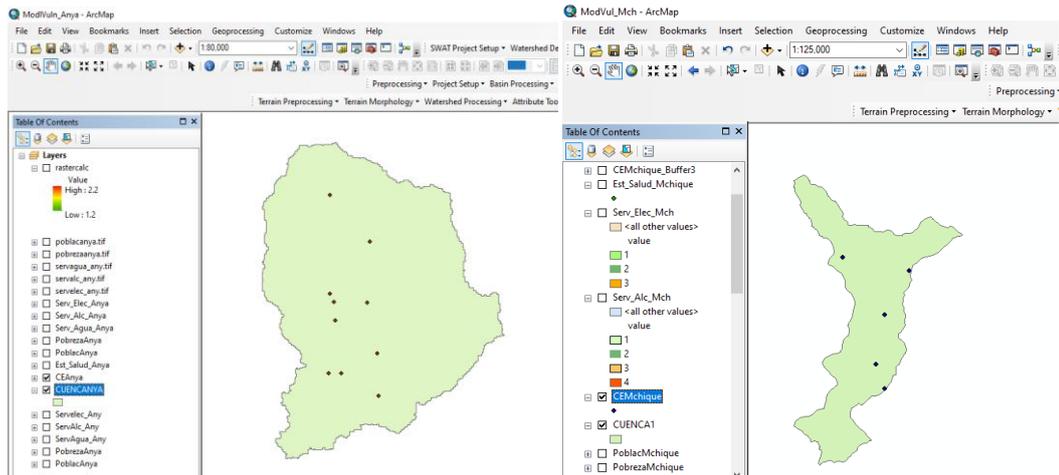


Figura 144: Ubicación de las Instituciones Educativas de las cuencas Anya y Mchique

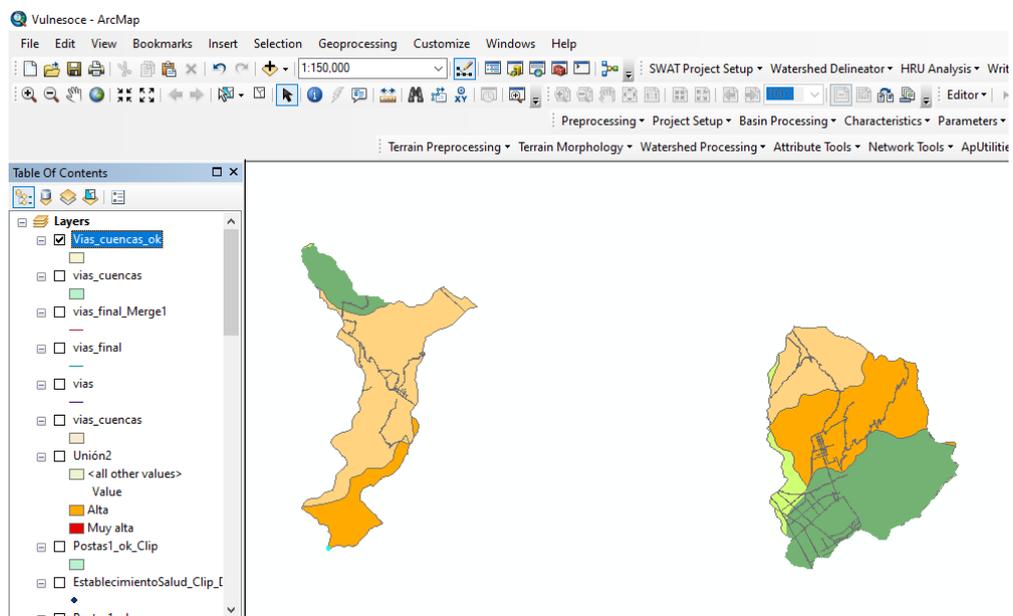


Figura 145: Trazado de las vías de las cuencas Anya y Mchique