

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



“INFLUENCIA DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LA RELACION  
PRECIPITACION-ESCORRENTIA EN LAS CUENCAS DEL ANYA Y  
MCHIQUE, JUNIN-PERÚ”

Presentado por:

ANTHONY HERBERT CAMONES CANO

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO AGRÍCOLA

Lima - PERÚ

2015

Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo

*Albert Einstein*

## **DEDICATORIA**

A Dios, por guiar mi camino.

A mi familia, mis padres Román y Gloria, por su incondicional apoyo, sus consejos y confianza, todo lo que soy ahora es gracias a ellos.

A mis hermanos Jovana, Ronaldo y Jorge; que son un ejemplo a seguir y que más que hermanos son mis mejores amigos.

## **AGRADECIMIENTO**

La presente investigación se llevó a cabo gracias al financiamiento del Proyecto VLIR-UOS/UNALM (*Vlaamse Interuniversitaire Raad/University Development Cooperation-Universidad Nacional Agraria la Molina*), formando parte del Proyecto 1: Investigación en Sistemas Agrarios, Subproyecto 5: Manejo de Cuencas Hidrográficas.

Un especial agradecimiento a mi patrocinador de tesis el Dr. Eduardo Chávarri V. por sus conocimientos compartidos, por su dedicación y guía para la realización de la presente tesis, y ser una referencia en mi desarrollo profesional y al Ing. Diego Grados B. por las ideas y sugerencias compartidas. Asimismo, a todo el equipo de trabajo del proyecto VLIR, especialmente a los señores (as): Jeny, Angélica, Vanesa, Jesús, Nicolas, Nilton, Cecinio, Alejandro, Soraida y Elvis; por los gratos momentos compartidos y por su apoyo en los últimos meses.

## RESUMEN

Desde el punto de vista de la hidrología de superficie y del diseño hidrológico, el agua en el suelo es importante tanto por su almacenamiento en perfiles que incide en la formación del flujo base (flujo superficial y profundo), como por el campo de velocidades generadas por su movimiento en medio poroso (el suelo) en condiciones saturadas o no saturadas. Es por estas razones que se plantea realizar el estudio de la influencia de la humedad del suelo en el proceso de Precipitación- Escorrentía en los ríos Anya y Mchique (subcuencas del Mantaro), ya que estos se caracterizan por poseer variabilidad estacional marcada entre los periodos de estiaje y avenidas afectando de esta manera el equilibrio ambiental en las cuencas.

La presente investigación se obtuvo a partir de la información *in situ* de las estaciones pluviométricas (Sincos, Tambo), meteorológicas (Quilcas, Cruzpampa, Chacrampa y Colpar) e hidrométricas (Anya y Mchique), previamente instaladas, con el fin de registrar las precipitaciones y los niveles de agua diarios en ambas cuencas durante el periodo Diciembre 2013-Marzo 2015, además también se midió la humedad del suelo con un equipo TDR, una vez al mes durante el periodo antes mencionado, con el fin de monitorear la humedad en ambas cuencas tanto en el periodo de lluvias como en el de estiaje.

Finalmente se usaron los modelos Hec-HMS (soil moisture accounting) y R.S Minerve (HBV) con el objetivo de simular la humedad del suelo y los caudales, e identificar en cuál de los dos modelos se obtienen mejores resultados. Ambos modelos fueron calibrados y validados a nivel diario para las cuencas en estudio.

*Palabras claves: precipitación, caudal, humedad del suelo, influencia, Hec-HMS, R.S-Minerve.*

## **ABSTRACT**

From the point of view of surface hydrology and hydrologic design, the water in the soil is important both for its storage profiles that affect the formation of the base flow (surface and deep flow) for as the field speed generated by its movement in porous medium ( the soil) in saturated or unsaturated conditions . It is for these reasons that were planted perform the study of the influence of soil moisture in the process of Precipitation- Runoff in the rivers Anya and Mchique (mantaro's subbasins), as these are characterized by marked seasonal variability between periods of drought and floods peak affecting the environmental balance in the basins.

This research was obtained from information in situ rainfall stations (Sincos , Tambo) , meteorological stations (Quilcas , Cruzpampa , Chacrampa and Colpar) and hydrometric stations (Anya and Mchique) which were installed previously, with the order to record rainfall and daily water levels in both basins during the period December 2013 - March 2015, in addition also soil moisture was measured with a TDR equipment, once a month during the above period , with the order to monitor the moisture in both basins so in the rainy and in the dry season.

Finally the models used were Hec-HMS (soil moisture accounting) and R.S-Minerve (HBV) with the order to simulate the soil moisture and flows, and identify in which of the models are obtained best results. Both models were calibrated and validated at the daily for basins in study.

*Keywords: precipitation, floods, soil moisture, influence, Hec-HMS R.S-Minerve.*

# INDICE GENERAL

	Pág.
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. OBJETIVOS</b> .....	3
2.1 Objetivo General .....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
<b>III. REVISIÓN DE LA LITERATURA</b> .....	4
3.1 PLUVIOMETRÍA .....	4
3.1.1. Densidad de estaciones pluviométricas .....	4
3.1.2. Pluviómetros de registro continuo.....	5
3.1.3. Tipos de errores en la medición.....	6
3.1.4. Precipitación total diaria.....	6
3.2 HIDROMETRÍA .....	7
3.2.1. Relación nivel-caudal .....	7
3.2.2. Caudal medio diario .....	7
3.2.3. Proceso de aforo con correntómetro.....	8
3.2.4. Métodos de estimación de la velocidad media .....	10
3.2.5. Cálculo del caudal aforado .....	11
3.3 HUMEDAD DEL SUELO .....	13
3.3.1. Métodos para medir la humedad del suelo .....	14
3.3.2. Métodos Dieléctricos .....	14
3.4 INTERPOLACIÓN .....	17
3.4.1. Método de interpolación de Spline.....	18
3.5 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS.....	19
3.5.1. Preparación de datos .....	19
3.6 MODELO HIDROLÓGICO .....	20
3.6.1. Modelamiento determinístico .....	21
3.6.2. Elección de un modelo hidrológico .....	22
3.6.3. Calibración del modelo.....	23
3.6.4. Validación del modelo.....	26
3.6.5. Sistema de modelación hidrológica Hec-Hms.....	27
3.6.6. Sistema de modelación hidrológica R.S-Minerve .....	29
3.7 ESTUDIOS REALIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	30

3.7.1. Geología y Suelos.....	30
3.7.2. Cobertura y uso de suelos.....	31
3.7.3. Clima .....	32
3.7.4. Máximas avenidas en los ríos Anya y Mchique .....	32
3.7.5. Balance hídrico superficial de las cuencas Anya y Mchique. ....	33
<b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
4.1. MATERIALES.....	34
4.1.1. Ubicación y descripción de la zona de estudio.....	34
4.1.2. Información cartográfica .....	36
4.1.3. Información geológica.....	36
4.1.4. Información pluviométrica .....	36
4.1.5. Información hidrométrica .....	37
4.1.6. Materiales, equipos y programas de cómputo .....	38
4.2. MÉTODOS .....	44
4.2.1. Hidrometeorología.....	44
4.2.2. Humedad del suelo .....	50
4.2.3. Análisis exploratorio de datos .....	51
4.2.4. Geomorfología.....	52
4.2.5. Análisis de la variabilidad de la precipitación diaria.....	60
4.2.6. Sistema de modelación hidrológica-HEC-HMS.....	62
4.2.7. Sistema de modelación hidrológica-R.S. Minerve .....	74
4.2.8. Calibración y validación de los modelos .....	83
4.2.9. Análisis de sensibilidad.....	87
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>89</b>
5.1. DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS Y DE LA COBERTURASY USO DE SUELO DE LAS CUENCAS ANYA Y MCHIQUE.....	89
5.2. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN, HUMEDAD DEL SUELO, CAUDALES MEDIOS DIARIOS Y DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	93
5.2.1. Información pluviométrica .....	93
5.2.2. Información de la humedad del suelo.....	95
5.2.3. Información Hidrométrica .....	98
5.2.4. Evapotranspiración de referencia .....	100
5.3. DE LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS .....	101

5.3.1. Sistema de modelación hidrológica (SMH)-Hec-Hms .....	101
5.3.2. Sistema de modelación hidrológica (SMH)- R.S-Minerve .....	108
5.4. COMPARACIÓN DE LA SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO ENTRE LOS SISTEMAS DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA (SMH) HEC-HMS Y R.S-MINERVE.....	116
<b>VI. CONCLUSIONES</b> .....	119
<b>VII. RECOMENDACIONES</b> .....	122
<b>VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	123
<b>IX. ANEXOS</b> .....	126

## FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1: Mecanismo Tipping-Bucket (vista de perfil) .....	5
Figura 2: Mecanismo Tipping-Bucket (vista de planta) .....	6
Figura 3: Método de la sección media para el cálculo del caudal aforado .....	12
Figura 4: Diagrama hipotético de los componentes del suelo .....	13
Figura 5: Equipo TDR .....	16
Figura 6: Exactitud y precisión en mediciones. Izquierda: grupo de medidas consideradas exactas. Derecha: grupo de medidas consideradas precisas .....	24
Figura 7: Efectos de las medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo .....	26
Figura 8: Cobertura y uso de suelo de la cuenca Anya: (a) Bosques, (b) Pajonal, (c) Agrícola y (d) Población.....	31
Figura 9: Cobertura y uso de suelo de la cuenca Mchique: (a) Pajonal, (b) Agrícola y (c) Población .....	32
Figura 10: Ríos principales de las cuencas en estudio: (a) Río Anya y (b) Río Mchique ....	33
Figura 11: Altimetría de la cuenca del río Anya .....	35
Figura 12: Altimetría de la cuenca del río Mchique .....	35
Figura 13: Correntómetro FP111 .....	38
Figura 14: Estación pluviométrica RG3-M .....	39
Figura 15: Estación minimeteorológica WatchDog 120 .....	40
Figura 16: Estación meteorológica Wireless Vantage Pro2™ Plus .....	41
Figura 17: Registrador automático Diver D501 .....	42
Figura 18: Registrador automático Baro-Diver .....	42
Figura 19: GPS Garmin MAPS 60Csx.....	43

Figura 20: Fieldscout TDR 300.....	43
Figura 21: Hidrograma mediante las lecturas de escala y su curva de calibración .....	46
Figura 22: Gráfico de Histograma .....	51
Figura 23: Impacto de la forma de la cuenca en el hidrograma .....	57
Figura 24: Orden de ríos según el criterio de Strahler.....	58
Figura 25: Polígonos de Thiessen.....	63
Figura 26: Esquema conceptual del Módulo de HEC-HMS Soil Moisture Accounting.....	64
Figura 27: Estructura del modelo Hbv .....	77
Figura 28: Polígono de frecuencias de la cuenca del río Anya .....	126
Figura 29: Rectángulo equivalente de la cuenca del río Anya .....	126
Figura 30: Curva hipsométrica de la cuenca del río Anya .....	127
Figura 31: Polígono de frecuencias de la cuenca del río Mchique.....	127
Figura 32: Rectángulo equivalente de la cuenca del río Mchique.....	128
Figura 33: Curva hipsométrica de la cuenca del río Mchique .....	128
Figura 34: Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Quilcas .....	129
Figura 35: Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Colpar .....	129
Figura 36: Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Tambo .....	130
Figura 37: Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Sincos.....	130
Figura 38: Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Chacrampa .....	131
Figura 39: Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Cruzpampa.....	131
Figura 40: Variabilidad espacial de la media (mm) de la precipitación periodo dic 13-mar15.....	132
Figura 41: Variabilidad espacial de la varianza (mm <sup>2</sup> ) de la precipitación periodo dic 13-mar15.....	132
Figura 42: Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Quilcas .	133
Figura 43: Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Colpar ..	133
Figura 44: Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Tambo ..	134
Figura 45: Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Sincos...	134
Figura 46: Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Chacrampa.....	135
Figura 47: Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación	

Cruzpampa.....	135
Figura 48: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Quilcas.....	136
Figura 49: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Colpar.....	136
Figura 50: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Tambo.....	137
Figura 51: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Sincos.....	137
Figura 52: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Chacrampa.....	138
Figura 53: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Cruzpampa.....	138
Figura 54: Matriz de correlaciones de la precipitación total diaria, periodo dic13-mar15.....	139
Figura 55: Mapa de ubicación de los puntos de humedad de la cuenca Anya.....	139
Figura 56: Mapa de ubicación de los puntos de humedad de la cuenca Mchique.....	140
Figura 57: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Diciembre 2013.....	140
Figura 58: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Enero 2014.....	141
Figura 59: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Febrero 2014.....	141
Figura 60: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Marzo 2014.....	142
Figura 61: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Abril 2014.....	142
Figura 62: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Mayo 2014.....	143
Figura 63: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Junio 2014.....	143
Figura 64: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Julio 2014.....	144
Figura 65: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Agosto 2014.....	144
Figura 66: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Setiembre 2014.....	145
Figura 67: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Octubre 2014.....	145
Figura 68: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Noviembre 2014.....	146
Figura 69: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Diciembre 2014.....	146
Figura 70: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Enero 2015.....	147

Figura 71: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Febrero 2015 .....	147
Figura 72: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Marzo 2015 .....	148
Figura 73: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Diciembre 2013 .....	148
Figura 74: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Enero 2014 .....	149
Figura 75: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Febrero 2014 .....	149
Figura 76: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Marzo 2014 .....	150
Figura 77: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Abril 2014 .....	150
Figura 78: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Mayo 2014 .....	151
Figura 79: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Junio 2014 .....	151
Figura 80: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Julio 2014 .....	152
Figura 81: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Agosto 2014 .....	152
Figura 82: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Setiembre 2014.....	153
Figura 83: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Octubre 2014.....	153
Figura 84: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Noviembre 2014.....	154
Figura 85: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Diciembre 2014.....	154
Figura 86: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Enero 2015 .....	155
Figura 87: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Febrero 2015 .....	155
Figura 88: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Marzo 2015 .....	156
Figura 89: Serie temporal de la humedad del suelo de la cuenca Anya .....	156
Figura 90: Serie temporal de la humedad del suelo de la cuenca Mchique.....	157
Figura 91: Variación espacial de la media de la humedad del suelo (%), dic13-mar15 ....	157
Figura 92: Variación espacial de la varianza de la humedad del suelo (%2), dic13-mar15.....	158
Figura 93: Caudales medios diarios observados del río Anya, periodo dic13-mar15.....	158
Figura 94: Caudales medios diarios observados del río Mchique, periodo dic13-mar15 ..	159
Figura 95: Curva de calibración de la estación Anya, periodo dic13-mar15 .....	159
Figura 96: Curva de calibración de la estación Mchique, periodo dic13-mar15.....	160
Figura 97: Sección típica del río Anya, estación hidrométrica Anya.....	160
Figura 98: Sección típica del río Anya, estación hidrométrica Mchique .....	161
Figura 99: Serie de evapotranspiración de referencia diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Colpar .....	161

Figura 100: Serie de evapotranspiración de referencia diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Chacrampa .....	162
Figura 101: Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic13-mar15.....	163
Figura 102: Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Anya, periodo dic13-mar15 .....	163
Figura 103: Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Anya, periodo dic13-mar15.....	164
Figura 104: Humedad observada y simulada de la cuenca Anya, periodo dic13-mar15 ...	164
Figura 105: Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Anya, coeficiente de correlación de Pearson de los caudales simulados.....	165
Figura 106: Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Anya, eficiencia de .....	165
Figura 107: Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Anya, eficiencia de Nash Sutcliffe de los caudales simulados .....	166
Figura 108: Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Anya, coeficiente de correlación de Pearson de la humedad simulada .....	166
Figura 109: Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic13-mar15.....	167
Figura 110: Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Mchique, periodo dic13-mar15.....	167
Figura 111: Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Mchique, periodo dic13-mar15 .....	168
Figura 112: Humedad observada y simulada de la cuenca Mchique, periodo dic13-mar15.....	168
Figura 113: Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Mchique, eficiencia de Nash Sutcliffe de los caudales simulados .....	169
Figura 114: Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Mchique, coeficiente de correlación de Pearson de los caudales simulados .....	169
Figura 115: Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Mchique, eficiencia de Nash Sutcliffe de la humedad del suelo .....	170

Figura 116: Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Mchique, coeficiente de correlación de Pearson de la humedad del suelo.....	170
Figura 117: Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic13-mar15.....	171
Figura 118: Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Anya periodo dic13-mar15 .....	171
Figura 119: Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Anya, periodo dic13-mar15.....	172
Figura 120: Humedad observada y simulada de la cuenca Anya, periodo dic13-mar15 ...	172
Figura 121: Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Quilcas .	173
Figura 122: Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Colpar ..	173
Figura 123: Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Colpar ..	174
Figura 124: Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya, eficiencia de Nash Sutcliffe de los caudales.....	174
Figura 125: Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya, coeficiente de correlación de Pearson de los caudales .....	175
Figura 126: Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya, eficiencia de Nash Sutcliffe de la humedad del suelo .....	175
Figura 127: Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya, coeficiente de correlación de Pearson de la humedad del suelo.....	176
Figura 128: Caudales medios diarios observados y simulados del río Mchique, periodo dic13-mar15.....	176
Figura 129: Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Mchique, periodo dic13-mar15 .....	177
Figura 130: Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Mchique, periodo dic13-mar15.....	177
Figura 131: Humedad observada y simulada de la cuenca Mchique, periodo dic13-mar15.....	178
Figura 132: Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Sincos...	178
Figura 133: Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica chacrampa.....	179

Figura 134: Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Cruzpampa.....	179
Figura 135: Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique, eficiencia de Nash Sutcliffe de los caudales.....	180
Figura 136: Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique, coeficiente de correlación de Pearson de los caudales .....	180
Figura 137: Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique, eficiencia de Nash Sutcliffe de la humedad del suelo .....	181
Figura 138: Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique, coeficiente de correlación de Pearson de la humedad del suelo.....	181
Figura 139: Simulación de la humedad del suelo de la cuenca Anya, comparación entre el Hec Hms y R.S Minerve.....	182
Figura 140: Simulación de los caudales medios diarios de la cuenca Anya, comparación entre el Hec Hms y R.S Minerve.....	182
Figura 141: Simulación de la humedad del suelo de la cuenca Mchique, comparación entre el Hec Hms y R.S Minerve.....	183
Figura 142: Simulación de los caudales medios diarios de la cuenca Mchique, comparación entre el Hec Hms y R.S Minerve.....	183
Figura 143: Precipitación vs humedad del suelo observada vs caudales observados, de la cuenca Anya, periodo dic13-mar15.....	184
Figura 144: Precipitación vs humedad del suelo observada vs caudales observados, de la cuenca Mchique, periodo dic13-mar15 .....	184

## TABLAS

	<i>Pág</i>
Tabla 1: Valores mínimos recomendados de densidad d estaciones (superficie, en Km2 por estación).....	4
Tabla 2: Densidad de estaciones pluviométricas recomendadas .....	5
Tabla 3: Análisis exploratorio de datos .....	20
Tabla 4: Ubicación política de las cuencas Anya y Mchique.....	34
Tabla 5: Ubicación de estaciones pluviométricas y meteorológicas en la cuenca Anya.....	37
Tabla 6: Ubicación de estaciones pluviométricas y meteorológicas en la cuenca Mchique	37
Tabla 7: Ubicación de estaciones limnimétricas .....	37
Tabla 8: Ubicación de equipos diver en las cuencas en estudio.....	38
Tabla 9: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Anya.....	63
Tabla 10: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Mchique .....	63
Tabla 11: Sub-zonas de almacenamiento del perfil del suelo, modelo SMA.....	66
Tabla 12: Parámetros del submodelo de pérdidas SMA de Hec-HMS .....	67
Tabla 13: Parámetros de secciones típicas .....	71
Tabla 14: Estimaciones de clases texturales.....	73
Tabla 15: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Anya.....	76
Tabla 16: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Mchique .....	77
Tabla 17: Lista de parámetros y condiciones iniciales para el modelo HBV.....	78
Tabla 18: Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe .....	84
Tabla 19: Parámetros geomorfológicos de las cuencas Anya y Mchique .....	91
Tabla 20: Distribución de las Coberturas y uso de suelo en la cuenca Anya.....	92
Tabla 21: Distribución de las Coberturas y uso de suelo en la cuenca Anya.....	92
Tabla 22: Estadísticas descriptivas de las estaciones .....	93

Tabla 23: Variación espacial de la media y varianza de la precipitación (Diciembre 2013-Marzo2015).....	94
Tabla 24: Matriz de correlaciones (r) de la precipitación total diaria (Diciembre 2013-Marzo 2015).....	95
Tabla 25: Estadísticas descriptivas de las subcuencas de la cuenca Anya y Mchique.....	97
Tabla 26: Estadísticas descriptivas de las series de caudales diarios (Diciembre 2013-Marzo 2015).....	100
Tabla 27: Estadísticas descriptivas de las series de evapotranspiración de referencia diaria (Diciembre 2013-Marzo 2015).....	100
Tabla 28: Parámetros estadísticos, modelo Hec-Hms de la cuenca Anya (Simulación de caudales).....	101
Tabla 29: Parámetros estadísticos, modelo Hec-Hms de la cuenca Anya.....	103
Tabla 30: Parámetros calibrados del submodelo de pérdidas, modelo continuo Hec-Hms de la cuenca Anya.....	103
Tabla 31: Parámetros estadísticos, modelo Hec-Hms de la cuenca Mchique (Simulación de caudales).....	105
Tabla 32: Parámetros estadísticos, modelo Hec-Hms de la cuenca Mchique.....	106
Tabla 33: Parámetros calibrados del submodelo de pérdidas, modelo continuo Hec-Hms de la cuenca Mchique.....	107
Tabla 34: Parámetros estadísticos, modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya (Simulación de caudales).....	108
Tabla 35: Parámetros estadísticos, modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya.....	110
Tabla 36: Condiciones iniciales y parámetros calibrados del modelo HBV, del SMH R.S-Minerve de la cuenca Anya.....	111
Tabla 37: Parámetros estadísticos, modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique (Simulación de caudales).....	112
Tabla 38: Parámetros estadísticos, modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique (Simulación de la humedad del suelo).....	114
Tabla 39: Condiciones iniciales y parámetros calibrados del modelo HBV, del SMH R.S-Minerve de la cuenca Mchique.....	115
Tabla 40: Comparación entre los SMH Hec-Hms y R.S-Minerve en la simulación de	

humedad del suelo en la cuenca Anya.....	116
Tabla 41: Comparación entre los SMH Hec-Hms y R.S-Minerve en la simulación de los caudales en la cuenca Anya .....	117
Tabla 42: Comparación entre los SMH Hec-Hms y R.S-Minerve en la simulación de la humedad del suelo en la cuenca Mchique .....	117
Tabla 43: Comparación entre los SHM Hec-Hms y R.S-Minerve en la simulación de los caudales en la cuenca Mchique .....	118

## ANEXOS

	<i>Pág.</i>
<b>Anexo 1: Descripción de las características geomorfológicas y de la cobertura y uso de suelo de las cuencas Anya y Mchique.....</b>	<b>126</b>
<b>Anexo 2: De la descripción del comportamiento de la precipitación, humedad del suelo y de los caudales medios diarios.....</b>	<b>129</b>
Anexo 2.1: Pluviometría.....	129
Anexo 2.2: Humedad del suelo.....	139
Anexo 2.3: Hidrometría.....	158
Anexo 2.4: Series de evapotranspiración de referencia (mm/día).....	159
<b>Anexo 3: Simulación del comportamiento hidrológico de las cuencas.....</b>	<b>163</b>
Anexo 3.1: Sistema de modelación hidrológica Hec-Hms.....	163
Anexo 3.2: Modelo hidrológico R.S-Minerve.....	171
<b>Anexo 4: Panel fotográfico de actividades en campo.....</b>	<b>185</b>
<b>Anexo 5: Mapas.....</b>	<b>201</b>
Mapa 1: Mapa de ubicación de las cuencas Anya y Mchique.....	201
Mapa 2: Mapa de cobertura y uso de suelo.....	202
Mapa 3: Mapa geológico.....	203
Mapa 4: Mapa de ubicación de estaciones hidrometeorológicas.....	204

## FOTOGRAFÍAS

*Pág.*

<b>Foto1:</b> Estaciones pluviométricas y meteorológicas instaladas por el proyecto de Cooperación Belga VLIR/UOS-UNALM.....	185
<b>Foto 2:</b> Mecanismo Tipping bucket del pluviómetro RG3-M.....	186
<b>Foto 3:</b> Procedimiento de descarga de datos, estación pluviométrica Tambo.....	187
<b>Foto 5:</b> Mantenimiento de la estación meteorológica Davis modelo Vantage Pro2™ Plus.....	188
<b>Foto 6:</b> Calibración de las estaciones meteorológicas Davis modelo Vantage Pro2™ Plus, con una estación patrón.....	188
<b>Foto 7:</b> Procedimiento de aforo del río Anya.....	189
<b>Foto 8:</b> Procedimiento de aforo del río Mchique.....	189
<b>Foto 9:</b> Estación hidrométrica Anya.....	190
<b>Foto 10:</b> Limpieza del cauce del río Anya.....	190
<b>Foto 11:</b> Estación hidrométrica Mchique.....	191
<b>Foto 12:</b> Limpieza del cauce del río Mchique.....	191
<b>Foto 13:</b> Estación meteorológica Cruzpampa.....	192
<b>Foto 14:</b> Procedimiento de descarga de datos del equipo Diver del río Anya.....	193
<b>Foto 15:</b> Vista de la cuenca Anya en época húmeda.....	194
<b>Foto 16:</b> Vista de la cuenca Anya en época seca.....	194
<b>Foto 17:</b> Vista de la cuenca Mchique en época húmeda.....	195
<b>Foto 18:</b> Vista de la cuenca Mchique en época seca.....	195
<b>Foto 19:</b> Ubicación con GPS de los puntos de humedad de la cuenca Anya.....	196
<b>Foto 20:</b> Ubicación con GPS de los puntos de humedad de la cuenca Mchique.....	197

<b>Foto 21:</b> Medición de la humedad del suelo con el equipo TDR, en la cuenca Anya.....	198
<b>Foto 22:</b> Medición de la humedad del suelo con el equipo TDR, en la cuenca Mchique..	199
<b>Foto 25:</b> Vista panorámica del distrito de Sincos.....	200
<b>Foto 24:</b> Vista panorámica del distrito de Quilcas.....	200

## I. INTRODUCCIÓN

Es importante el conocimiento del contenido de humedad del suelo ya que su influencia en los procesos hidrológicos condiciona fuertemente el comportamiento de una cuenca, tanto a escalas de crecidas (máximas avenidas) como a nivel de un balance de agua (balance hidrológico). Estudiar la humedad del suelo y conocer su distribución espacial y temporal es motivo de interés y, es por esto que se plantea realizar un estudio sobre el grado de influencia de la humedad del suelo en la relación Precipitación – Escorrentía a nivel diario, en las cuencas del Anya y del Mchique (subcuencas del Mantaro) cuyas áreas son de 47.3 Km<sup>2</sup> y de 28.29 Km<sup>2</sup>, respectivamente.

El contenido de agua en el suelo (CAS) es un parámetro básico que caracteriza el estatus hidrológico y transporte de agua en la zona no saturada; es un componente muy dinámico que cambia permanentemente y a veces drásticamente en el tiempo y en el espacio y ejerce gran influencia sobre otras propiedades y procesos físicos (Dirksen, 1999). Por otro lado la naturaleza dinámica del agua en el suelo hace que su medición se considere de vital interés tanto en investigación sobre agricultura y recursos hídricos, en general, como en modelos hidrológicos en particular. Sin embargo, las medidas de humedad en el suelo se realizan de forma generalizada en campos muy diversos tales como: prácticas agrícolas, evaluaciones biológicas de ecosistemas naturales, numerosas aplicaciones medioambientales y entre otros.

A nivel de cuencas conocer el agua que fluye y que es almacenada en el perfil del suelo es fundamental, por lo que se hace necesario cuantificarla en forma precisa y confiable. En la actualidad hay una gran variedad de métodos y técnicas para medir la humedad del suelo, pero en las últimas décadas se han desarrollado nuevos equipos y sensores que permiten

medir, en el espacio y el tiempo, el contenido de agua sin alterar en forma significativa las condiciones hidrodinámicas del suelo, uno de esos métodos es el TDR (Time Domain Reflectometry) el cual es uno de los más aceptados y precisos en la actualidad, ya que no altera de manera significativa las condiciones del suelo y se ajusta mejor a las condiciones de la presente investigación.

Por lo general no se considera a la humedad del suelo en los modelos hidrológicos debido a su gran variabilidad espacial y temporal, sin embargo existen diversos estudios que revelan la gran variabilidad de caudales que se pueden esperar y que son generados por una misma lámina de precipitación, lo que demuestra que el contenido de humedad del suelo es un factor importante en dicho proceso y que es necesario estudiarlo.

El monitoreo de las variables de estudio se realizarán durante el periodo de Diciembre 2013-Marzo 2015. Las cuencas Anya, Mchique y los puntos de muestreo de humedad, pueden ser apreciadas en el mapa 1.

Cabe mencionar que la presente tesis se desarrolló en el ámbito del Proyecto VLIR-UOS/UNALM (*Vlaamse Interuniversitaire Raad/University Development Cooperation-Universidad Nacional Agraria la Molina*), formando parte del Proyecto 1: Investigación en Sistemas Agrarios, Subproyecto 5: Manejo de Cuencas Hidrográficas.

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

- Determinar la influencia de la humedad del suelo en la relación Precipitación-Escorrentía en las cuencas del Anya y del Mchique.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar la relación entre las características geomorfológicas y el escurrimiento superficial en la zona de estudio.
- Describir el comportamiento de la humedad del suelo, precipitación y caudales medios diarios para las cuencas Anya y Mchique.
- Calibrar y validar los sistemas de modelación hidrológica (SMH) Hec Hms y R.S Minerve para la simulación de caudales en las cuencas Anya y Mchique.
- Comparar y determinar la incertidumbre en la simulación de la humedad del suelo mediante los SMH Hec Hms y el R.S Minerve.

### III. REVISIÓN DE LA LITERATURA

#### 3.1 PLUVIOMETRÍA

##### 3.1.1. Densidad de estaciones pluviométricas

La densidad de instrumentos de medición para obtener una estimación confiable de la precipitación sobre una determinada área ha sido siempre una incógnita difícil de responder. La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011) muestra, en la Tabla 2, los valores mínimos de densidad de estaciones pluviométricas sobre una determinada superficie; entendiéndose como *no registradoras* a estaciones tipo pluviómetros, y como *registradoras* a estaciones tipo pluviógrafos y estaciones pluviométricas automáticas.

**Tabla 1: Valores mínimos recomendados de densidad d estaciones (superficie, en Km2 por estación)**

Unidad Fisiográfica	Densidad de estaciones	
	No registradoras	Registradoras
Costa	900	9,000
Montaña	250	25,000
Planicie interior	575	5,750
Montes/ Ondulaciones	575	5,750
Islas pequeñas	25	250
Áreas urbanas	-	10 a 20
Polos/tierras áridas	10,000	100,000

FUENTE: OMM, 2011

Asimismo, Raghunath (2006) recomienda, en la tabla 2 valores de superficies aceptables para una estación pluviométrica.

**Tabla 2: Densidad de estaciones pluviométricas recomendadas (superficie, en Km<sup>2</sup> por estación)**

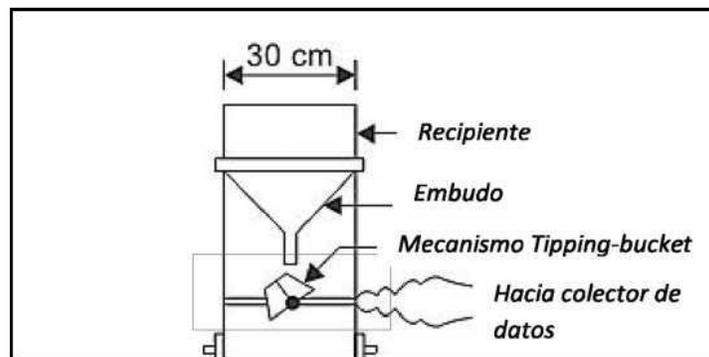
Unidad fisiográfica	Densidad de estaciones
Zonas planas	520
Regiones elevadas	260 – 390
Zonas montañosas y zonas muy lluviosas	130, preferiblemente con un 10% de las estaciones pluviométricas equipadas con el mismo tipo de registrador de datos.

FUENTE: Raghunath, 2006

### 3.1.2. Pluviómetros de registro continuo

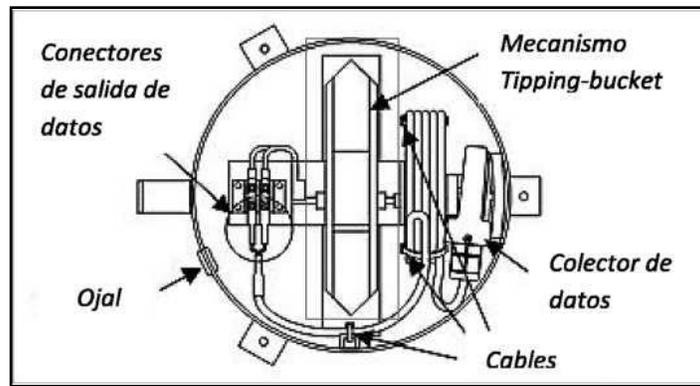
#### a. Mecanismo tipping-bucket

Este mecanismo consiste en un receptor cilíndrico de 30 cm de diámetro con un embudo en el interior (Figura 1), justo debajo se ubica un par de cubos de inflexión o mecanismo *tipping-bucket*. Los *bucket* son pequeños recipientes de plástico, ubicados en los extremos de un brazo transversal. Asimismo, el principio detrás de este mecanismo consiste en el llenado de un pequeño *bucket* (generalmente a los 0.2 mm), cuya inclinación para el vaciado de su contenido cierra un interruptor de láminas por medio de un imán unido a un brazo de equilibrio; este interruptor envía una señal eléctrica a un dispositivo de registro de datos (Figura 2), y graba el tiempo exacto en el que el *bucket* fue vaciado. Además, si la lluvia continúa cayendo, se llenará el *bucket* ubicado en el otro extremo del brazo equilibrado.



**Figura 1: Mecanismo Tipping-Bucket (vista de perfil)**

FUENTE: Raghunath, 2006



**Figura 2: Mecanismo Tipping-Bucket (vista de planta)**

FUENTE: Onset Computer Corporation, 2005

### 3.1.3. Tipos de errores en la medición

Existen diferentes tipos de errores asociados al funcionamiento del equipo, al entorno en el que se encuentra o debido a otros factores. Dentro de los tipos de errores más significativos se tiene:

- Error puntual, es un punto aberrante, error de lectura o de transcripción relacionado con funcionamiento del equipo.
- Error aleatorio, depende de las condiciones meteorológicas: valor erróneo por influencia del viento, por obstrucciones físicas, etc.
- Error sistemático, cambio en la posición de equipo o posibles cambios en el funcionamiento del equipo: calibración, modificaciones físicas, etc.

### 3.1.4. Precipitación total diaria

#### *a. Comportamiento estadístico de la precipitación diaria*

La fuente (2003) sostiene que la escala temporal en la que se estudia el fenómeno de la lluvia hace que la respuesta, la cantidad registrada durante la unidad de tiempo considerada, presente un comportamiento estadístico muy diferente. Si se trata de la cantidad total anual de precipitación, la distribución puede ser aproximadamente normal en muchas latitudes; sin embargo, esta hipótesis no será adecuada cuando el periodo considerado sea menor (mes, día u hora). Si se analiza una serie de datos pluviométricos de escala inferior a la anual son apreciables las siguientes características:

- *Estacionalidad del fenómeno'*, la lluvia es más frecuente o abundante en algunas épocas del año, siguiendo un ciclo anual.

*Presencia de observaciones con valor cero'*, dada la intermitencia del fenómeno pueden encontrarse épocas prolongadas en las que no se registra precipitación.

- *Distribución fuertemente asimétrica de las observaciones que superan el umbral apreciable;* cuando menor es la escala temporal de registro, mayor es la frecuencia de valores cercanos a cero, a la vez que es posible observar fuertes precipitaciones que proporcionan cantidad mucho mayor que la moda.

## **3.2 HIDROMETRÍA**

Según el Manual de aforo de caudales (OMM, 2010), el nivel del agua (o altura) corresponde a la elevación de la superficie de una corriente fluvial respecto a una superficie de referencia. Mediante su correlación con el caudal fluvial, el nivel del agua constituye el punto de partida para obtener registros de caudales.

### **3.2.1. Relación nivel-caudal**

El objetivo de aforar una corriente durante varias épocas en el año, en una sección determinada, es determinar lo que se conoce como curva de calibración de la sección. Ésta permite transformar niveles de agua, leídos con una mira, en caudales. Las curvas se construyen a partir de los aforos hechos durante un período largo de tiempo, de tal manera que se tengan niveles bajos y altos del río. Por medio de esta curva se obtienen los hidrogramas o gráficas de variaciones del caudal contra el tiempo en una sección determinada. Las curvas de calibración pueden cambiar por efectos erosivos, agradación, efectos de curvas de remanso o debido a flujo no permanente.

### **3.2.2. Caudal medio diario**

Es la tasa promedio de descarga en  $m^3/s$  para un período de 24 horas. Si se dispone de un limnógrafo (dispositivo que permite el registro continuo de los niveles en el tiempo), se puede obtener la hidrógrafa y calcular el caudal medio diario. Si no se tiene limnógrafo, para hallar el caudal promedio diario, es necesario hallar los caudales correspondientes de al menos 2 lecturas de mira diarias y luego promediarlos.

### 3.2.3. Proceso de aforo con correntómetro

El Manual de procedimientos hidrométricos (CVC, 2005) recomienda, para aforar una corriente con correntómetro, el siguiente procedimiento:

- *Verificación de las condiciones de la corriente*, antes de iniciar el aforo se debe verificar las condiciones de seguridad que ofrece el río (velocidad de la corriente y profundidad de flujo).
- *Registro de datos e información general en un formato previamente establecido*, una vez ubicados los técnicos aforadores en la estación hidrométrica, deben llenar los datos correspondientes al nombre de la estación, el código, la fecha, el nombre de los técnicos, la hora inicial, la marca del correntómetro, el número de serie y el método de aforo utilizado.
- *Lectura del nivel del agua en la mira*; luego de consignar los datos generales de la estación y el correntómetro, el equipo de trabajo debe leer la mira para establecer el nivel inicial que presenta el río. El dato obtenido de nivel del agua se registra en la hoja de aforo. Si se presentan variaciones importantes del nivel del agua durante la ejecución del aforo, se debe leer la mira cada vez que se va a realizar la medición en una vertical.
- *Determinación del ancho de la corriente*, el ancho del río se mide tendiendo una cinta métrica de orilla a orilla de manera perpendicular a la dirección de flujo. El dato obtenido se tiene en cuenta para el cálculo del número de verticales a utilizar en el aforo.
- *Cálculo del espaciamiento o distancia entre verticales*, cuando no existe una sección de aforo predeterminada en una corriente se establece el número de verticales de medición teniendo en consideración que la distancia entre verticales no supere el 20% del ancho del río, y procurando que este valor sea fácil de leer en la cinta métrica. El técnico aforador debe elaborar un esquema representativo de la sección transversal, en el cual registre los datos de ancho de la sección transversal y número de verticales empleadas.
- *Tendido de la cinta métrica'*, la cinta métrica (también puede utilizarse una cuerda graduada adecuadamente) se tiende y sujeta a dos puntos fijos, de modo que sea perpendicular en cualquier punto a la dirección de flujo. La cinta debe tener la

tensión necesaria para minimizar la catenaria y, además, debe estar situada a una altura que facilite al aforador la determinación de las abscisas correspondientes a cada una de las verticales de medición.

- *Determinación de la abscisa del punto de intersección del nivel del agua con el margen donde se inicia el aforo*, se sostiene el correntómetro sobre el punto en el cual se intercepta el nivel del agua con el contorno de la sección transversal, de tal modo que se garantice la perpendicularidad del conjunto; se lee el valor de la abscisa correspondiente basándose en la abscisa más cercana. Este valor registra en la hoja de aforo.
- *Traslado de equipos a la abscisa siguiente*, se posiciona el aforador con el correntómetro en la abscisa siguiente.
- *Medición de la profundidad de flujo*, para medir la profundidad de flujo en una vertical se desciende la varilla hasta que toque el lecho de la corriente procurando que el conjunto permanezca siempre en una posición tal que sea perpendicular al fondo. Se debe tener la precaución de evitar que la varilla se hunda y, por tanto, se produzcan errores en la medición. Luego, se escribe este valor en la hoja de aforo.
- *Medición de las velocidades de flujo*, con base en la profundidad de flujo medida en una vertical se establece el número de puntos en los cuales es necesario tomar la velocidad. Se calcula el (los) porcentaje (s) para determinar la(s) profundidad (es) a la que debe colocarse el equipo hidrométrico, se posiciona el correntómetro a la longitud correspondiente y se toman las lecturas para un tiempo de 60 segundos . Se consignan los datos en la hoja de aforo. Este procedimiento se repite para cada una de las verticales de medición seleccionadas.
- *Determinación de la abscisa a la que se encuentra el nivel del agua en la margen donde termina el aforo*, se aplica el mismo procedimiento empleado para la determinación de la abscisa correspondiente al nivel de agua inicial. Se escribe el dato en la hoja de aforo, luego de la última abscisa en la cual se hicieron determinaciones de profundidad y velocidad (es).
- *Lectura de mira una vez ha concluido el aforo'*, al final del aforo se lee nuevamente la mira para determinar el nivel del agua. El dato se registra en la hoja de aforo.
- *Determinación del caudal*, para lo cual se aplica el método de sección media.

### 3.2.4. Métodos de estimación de la velocidad media

Según el Manual de procedimientos hidrométricos (CVC, 2005), el cálculo de la velocidad media en cada sección se realiza siguiendo las siguientes ecuaciones.

#### a. Método de un punto (60%)

Se realiza la observación de la velocidad en cada vertical, colocando el correntómetro al 60% de la profundidad total por debajo de la superficie. El valor obtenido se considerará como la velocidad media de la vertical. La ecuación 1 muestra el cálculo de la velocidad media en la vertical.

$$Vi = v_{0.6h} \quad (1)$$

#### b. Método de los dos puntos (20% - 80%)

Las observaciones de velocidad se hacen en cada vertical, colocando el correntómetro al 20% y 80% de la profundidad total por debajo de la superficie. El promedio de los dos valores puede considerarse como velocidad media en la vertical. Este método es el más empleado cuando ya se conoce el comportamiento de la velocidad en la sección (obtenido mediante mediciones detalladas en los primeros aforos). La ecuación 2 muestra el cálculo de la velocidad media.

$$Vi = \frac{v_{0.2h} + v_{0.8h}}{2} \quad (2)$$

#### c. Método de los tres puntos (20%, 60% y 80%)

Se utiliza cuando las velocidades al 20 y 80% son inseguras a causa de la turbulencia, y no se ajustan a la tendencia normal de la velocidad en la vertical. Para ello, se incluye una medición al 60 %, a fin de obtener más detalle y ajustar el promedio de la abscisa. Se observa que a la velocidad del 60% se le da un factor de ponderación doble con respecto al 20% y 80%, por la mayor representatividad que tiene esta velocidad en la distribución

vertical. La ecuación 3 muestra el cálculo de la velocidad media.

$$V_i = \frac{v_{0.2h} + 2v_{0.6h} + v_{0.8h}}{4} \quad (3)$$

**d. Método de los cinco puntos (superficie - 20% - 60% - 80% - fondo)**

Cuando el cauce está libre de vegetación acuática y se quiere conocer el comportamiento de la velocidad media en la vertical de una manera más exacta se utiliza el método de los cinco puntos. Este se aplica ubicando el correntómetro en la superficie, al 20%, 60% y 80% y fondo, dándole diferentes pesos a cada uno de los porcentajes referidos como se observa en la ecuación 4. Cuando se sitúa el correntómetro en superficie y fondo, este no debe quedar ni por fuera de la superficie del agua ni rozando el fondo del cauce.

$$V_i = \frac{v_s + 3v_{0.2h} + 2v_{0.6h} + 3v_{0.8h} + v_f}{10} \quad (4)$$

### 3.2.5. Cálculo del caudal aforado

**a. Nivel constante**

Si la fluctuación del nivel del agua durante la medición de velocidades es menor al 5% de la profundidad media o es inferior a 5 cm, se debe adoptar el valor promedio del nivel para el cálculo de la descarga media. El caudal se calcula utilizando el método de la sección media.

- **Método de la sección media**

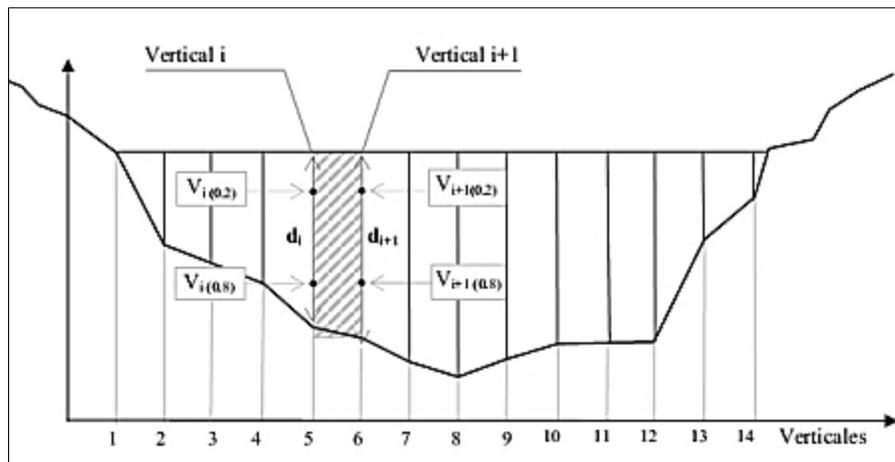
Se considera que la sección transversal está compuesta de un número de segmentos, cada uno de ellos limitado por dos verticales adyacentes. La ecuación 5 muestra el cálculo del caudal de la sección transversal.

$$q = \left( \frac{v_i + v_{i+1}}{2} \right) \cdot \left( \frac{d_i + d_{i+1}}{2} \right) \cdot b \quad (5)$$

Donde:

- $V_i, V_{i+1}$  : Velocidad media en las verticales  $i$  e  $i+1$  respectivamente (m/s).  
 $d_i, d_{i+1}$  : Verticales totales en las verticales  $i$  e  $i+1$ , respectivamente (m).  
 $b$  : Distancia horizontal entre las secciones (m).

El caudal en la primera y última franja de la sección transversal (es decir, en los sectores inmediatos a las abscisas) se puede estimar por medio de la ecuación 5, asumiendo que la profundidad y la velocidad en las abscisas son iguales a cero.



**Figura 3: Método de la sección media para el cálculo del caudal aforado**

FUENTE: CVC, 2005

Asimismo, el caudal total en la sección de aforo se obtiene sumando caudales parciales de cada una de las franjas tal como se muestra en la ecuación 6.

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (6)$$

Donde:

- $n$  : Número de franjas.  
 $Q_i$  : Caudal de cada una de  $i$  franjas ( $m^3/s$ )

### 3.3 HUMEDAD DEL SUELO

Se denomina humedad del suelo a la cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un terreno. El suelo se comporta como un depósito, al cual se le puede determinar la cantidad de agua almacenada en cualquier momento. El contenido de humedad del suelo en base al volumen se puede expresar como en la ecuación 7:

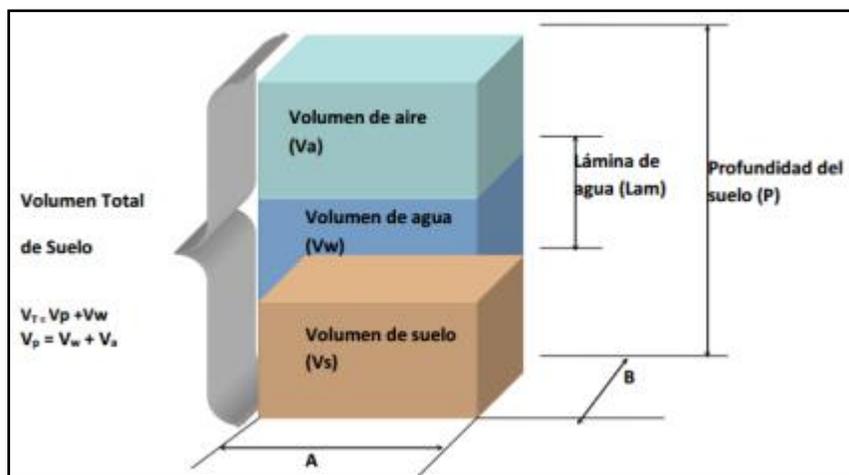
$$\theta(\%) = \frac{V_w}{V_T} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

$\theta$  : Es el contenido de humedad con base en volumen en porcentaje.

$V_w$ : Es el volumen ocupado por el agua.

Observando la siguiente figura, se establece la siguiente relación.



**Figura 4: Diagrama hipotético de los componentes del suelo**

FUENTE: R.A.S.P.A, Universidad de Colombia, 2013

$$\theta = \frac{A \times B \times Lam}{A \times B \times P} \longrightarrow Lam = \theta \times P \quad (8)$$

Donde:

Lam: Lámina de agua en el suelo (mm).

P: Profundidad del suelo.

La determinación del contenido de agua en el suelo es fundamental en todo estudio y caracterización hidrodinámica del suelo, modelización hidrológica y estudios relativos al

sistema suelo-planta-atmósfera. En la mayoría de estos trabajos es necesario disponer de abundantes medios, espaciales en el tiempo y realizadas en un mismo punto. (J. Martínez, J.M. Sánchez-Pérez y LH Cammeraat, 1994)

### **3.3.1. Métodos para medir la humedad del suelo**

Los métodos se pueden clasificar según la naturaleza y principios utilizados en métodos directos, que permiten medir directamente el contenido de agua en el suelo, y métodos indirectos, que se basan en la medida de alguna propiedad física del suelo dependiente del contenido de agua; calculan la humedad mediante una calibración entre ésta y una propiedad del suelo que es más fácil de medir (por ejemplo, la permitividad o constante dieléctrica relativa del suelo).

También se pueden clasificar según el grado de perturbación del suelo en: métodos destructivos, que alteran totalmente el suelo, cambiando así las condiciones hidrodinámicas del mismo; y no destructivos, donde las mediciones repetidas por largos períodos de tiempo no disturban el suelo y los valores de contenido de agua pueden ser obtenidos inmediatamente, en el mismo sitio y a la misma profundidad.

La gran mayoría de los métodos que son indirectos son también no destructivos. La dependencia de un parámetro físico del suelo del contenido de agua está teóricamente relacionada a los parámetros físicos de cada constituyente en la mezcla y de acuerdo a la relación entre ellos, siendo muy importante la calidad, estabilidad y consistencia de la calibración.

### **3.3.2. Métodos Dieléctricos**

El contenido de agua en el suelo puede ser medido utilizando las propiedades de las ondas electromagnéticas. La velocidad de propagación de un pulso electromagnético es una función de la “constante dieléctrica” del medio en el cual éste se propaga (Dalton et al., 1984; Dalton y van Genuchten, 1986; Florentino, 1990).

Los métodos dieléctricos consisten en una serie de métodos para medir el contenido de agua en el suelo a través de la medida de la permitividad o constante dieléctrica del mismo, Kab (Muñoz-Carpena, 2004). Son métodos basados en principios de reflectometría en el

dominio del tiempo (TDR), en el dominio de la frecuencia (FDR) o en el dominio de la amplitud (ADR), que determina la velocidad de un pulso u onda electromagnética a través del suelo. Tanto el TDR, FDR, ADR como las sondas de capacitancia hacen uso de la marcada diferencia en permitividad que existe entre el agua (con una constante dieléctrica de 81), la fase mineral (entre 2-5) y gaseosa (1) del suelo, para estimar el grado de saturación del mismo, donde la permitividad total del suelo es gobernada principalmente por la presencia de agua líquida (Topp y Davis, 1985; Muñoz-Carpena, 2004; Inoue et al., 2008).

Estos métodos, al igual que los otros métodos indirectos, necesitan de una curva de calibración que relaciona el contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\Theta$ ) y la permitividad ( $K_{ab}$ ), siendo desarrollada por Topp et al. (1980) una ecuación universal de calibración, adaptada para la mayoría de los suelos minerales (independiente de su composición y textura) y para contenidos de humedad inferiores a 50 %.

$$K_{ab} = 3.03 + 9.3\Theta + 146 \Theta^2 - 76.7 \Theta^3 \quad (9)$$

También se puede expresar como:

$$\Theta = (-530 + 292K_{ab} - 5.5 K_{ab}^2 + 0.043K_{ab}^3) \cdot 10^{-4} \quad (10)$$

Donde:

$\Theta$  : Contenido volumétrico de agua en el suelo.

$K_{ab}$  : Permitividad o constante dieléctrica.

Para suelos orgánicos, suelos volcánicos o bajo condiciones particulares y contenidos de agua superiores a 50 % esta ecuación no presenta buen ajuste, por lo que se necesita calibración específica. Por otro lado, una de las particularidades encontradas con estos métodos es que la relación; (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) vs  $K_{ab}$  depende de la frecuencia de la onda electromagnética, lo cual limita el uso de esta ecuación universal.

Otros factores que pueden afectar la permitividad efectiva del suelo (además de la humedad y frecuencia) son la temperatura, la salinidad, el contenido de materia orgánica, la mineralogía y el tamaño y forma de las partículas y los poros del suelo (Topp et al., 1980; Campbell, 1990; Weitz et al., 1997; Wraith y Or, 1999; Inoue et al., 2004; Kelleners et al., 2005).

- **Reflectometría de dominio del tiempo (TDR)**

Básicamente, el contenido volumétrico del agua en el suelo se obtiene determinando la constante dieléctrica aparente del suelo,  $K_{ab}$ , al medir el tiempo requerido por una onda electromagnética para recorrer un par de varillas metálicas (electrodos) introducidas en el suelo (Jones et al., 2002). El tiempo recorrido es proporcional a la constante dieléctrica del suelo y únicamente varía con el contenido de agua en el mismo.



**Figura 5: Equipo TDR**

Fuente: Elaboración propia.

Ventajas:

- Es no destructivo.
- Permite medidas continuas y automatizadas *in situ* (Starr et al., 1999).
- Usualmente no se requiere calibración específica; solo en algunos casos.
- Es muy preciso.
- Se puede medir a cualquier profundidad en el perfil y en capas de suelo muy delgadas ya que permite también la inserción horizontal en el perfil de suelo.
- Puede medirse también la salinidad del suelo.
- Amplia disponibilidad de tipos de TDR.
- No trabaja con fuente radiactiva.

- Es poco influenciado por otras características del suelo como Da, textura, temperatura, etc.

Limitaciones:

- Relativamente costoso, aunque en los últimos años son más asequibles.
- Aplicabilidad potencialmente limitada en suelos altamente salinos o en suelos arcillosos muy pesados.
- Requiere calibración específica en algunas condiciones (Ej. suelos orgánicos y volcánicos).
- Considera un pequeño volumen de suelo (alrededor del largo de las varillas).
- Para cada profundidad de medición se necesita insertar varillas metálicas, ya que por diferencia se va a obtener la humedad correspondiente a cada capa o espesor de suelo.

### **3.4 INTERPOLACIÓN**

La interpolación es un proceso por el cual se define un valor en un punto cualquiera a partir de los valores conocidos en algunos puntos dados. (Néstor Calvo, 2011).

La interpolación predice valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra. Puede utilizarse para prever valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico, tales como: elevación, precipitaciones, concentraciones químicas, niveles de ruido entre otros.

Existen diferentes maneras de derivar una predicción para cada ubicación; cada método se denomina modelo. Con cada modelo, se realizan diferentes suposiciones acerca de los datos, y algunos modelos son más aplicables para determinados datos, por ejemplo, un modelo puede dar cuenta de la variación local mejor que otro. Cada modelo produce predicciones usando diferentes cálculos.

Las herramientas de interpolación, por lo general, se dividen en métodos determinísticos y de estadísticas geográficas.

- Los métodos determinísticos de interpolación asignan valores a las ubicaciones basándose en los valores medidos circundantes y en fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Los métodos determinísticos incluyen IDW (ponderación de distancia inversa), Vecino natural, Tendencia y Spline.
- Los métodos de estadísticas geográficas están basados en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación (la relación estadística entre los puntos medidos). Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o exactitud de las predicciones. Kriging es un método de interpolación de estadísticas geográficas.

### **3.4.1. Método de interpolación de Spline**

La herramienta Spline utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada.

Conceptualmente, los puntos de muestra se extruden a la altura de su magnitud; spline curva una hoja de goma que pasa a través de los puntos de entrada mientras minimiza la curvatura total de la superficie. Ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos de entrada más cercanos mientras pasa a través de los puntos de muestra. Este método es mejor para generar superficies que varían levemente, como la elevación, la altura de las tablas de agua o las concentraciones de contaminación, entre otros.

La forma básica de la curvatura mínima de interpolación por spline impone las siguientes dos condiciones en el interpolante:

- La superficie debe pasar exactamente por los puntos de datos.
- La superficie debe tener una curvatura mínima (la suma acumulativa de los cuadrados de los términos de la derivada segunda de la superficie tomada sobre cada punto de la superficie debe ser mínima).

Tipos de spline:

- **Spline Regularizado**

El método regularizado crea una superficie suave que cambia gradualmente con los valores que pueden estar afuera del rango de datos de muestra.

- **Spline de Tensión**

El método de tensión controla la rigidez de la superficie de acuerdo al carácter del fenómeno modelado. Crea una superficie menos suave con valores que están más restringidos por el rango de datos de la muestra.

### **3.5 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS**

El Análisis exploratorio de datos (AED) surge de los trabajos realizados por Turkey (1977), desde entonces su uso se ha venido incrementando, ya que se ha comprobado que el examen previo de los datos es un paso necesario. Muchas veces las tareas implícitas en dicho examen pueden parecer insignificantes y sin consecuencias a primera vista, pero son una parte esencial de cualquier análisis estadístico. El uso directo de la data sin evaluar su estructura, consistencia, presencia de valores atípicos y relaciones entre variables, entre otros, constituye un enfoque de caja negra que incrementa el grado de incertidumbre sobre la validez de los resultados obtenidos.

#### **3.5.1. Preparación de datos**

El primer paso del AED es hacer accesible los datos a cualquier técnica estadística, para ello se incorporan de acuerdo a las opciones disponibles del programa estadístico utilizado, se efectúa la entrada de datos y su codificación (Salvador Figueras y Gargallo, 2003). Una vez organizados los datos se procede a las siguientes etapas. Los pasos (a) y (b) tienen implícito análisis estadísticos y de datos que se pueden agrupar en dos clases:

- a. Cuantitativo o numérico:* se refiere al conjunto de procedimientos estadísticos que producen un resultado numérico o tabular, son muy importantes y constituyen la corriente principal en términos del análisis clásico. Ejemplo: las pruebas de

hipótesis, el análisis de varianza, las estimaciones puntuales y los intervalos de confianza, la regresión de mínimos cuadrados.

- b. *Gráfico*: constituye una gran colección de herramientas estadísticas que generalmente son referidas como técnicas gráficas, donde se incluye: gráficos de dispersión, histogramas, probabilidades, residuales, caja y bloques. En la práctica, para analizar los datos se utiliza una mezcla de ambos tipos de análisis. El tipo de análisis a realizar depende de la escala de medida de la variable analizada tal como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3: Análisis exploratorio de datos**

<b>Escala de medida</b>	<b>Representaciones gráficas</b>	<b>Medidas de tendencia central</b>	<b>Medidas de dispersión</b>
Nominal	Diagrama de barras	Moda	
	Diagrama de líneas		
	Diagrama de sectores		
Ordinal	BoxPlot	Mediana	Rango intercuartil
Intervalo	Histogramas	Media	Desviación típica
	Polígono de frecuencias		
Razón		Media geométrica	Coefficiente de variación

FUENTE: Salvador Figueras y Gargallo (2003).

### 3.6 MODELO HIDROLÓGICO

Es la representación esquemática de un fenómeno hidrometeorológico que ocurre dentro de la cuenca hidrográfica, realizado con el objetivo de estudiar o de analizar la influencia que ejerce un fenómeno. La representación puede ser matemática o física, en el primer caso el modelo es el resultado de expresiones analíticas de la complejidad observada que se representa mediante ecuaciones. La segunda es una maqueta que reproduce el fenómeno a una escala determinada.

Existen diferentes tipos de modelos dependiendo de la naturaleza, técnicas y procedimientos que utilizan para la cuantificación del valor de las variables, dentro de los cuales tenemos entre los más significativos:

- Modelos determinísticos o estocásticos.
- Modelos empíricos o estadísticos.
- Modelos globales o discretos (distribuido).
- Modelos lineales o no lineales.
- Modelo estacionarios o no estacionarios.

### **3.6.1. Modelamiento determinístico**

Según Salgado y Guitrón de los Reyes (2012), la modelación hidrológica se clasifica en estocástica y determinista. Un modelo es estocástico cuando al menos una variable del mismo es tomada como un dato al azar y las relaciones entre variables se toma por medio de funciones probabilísticas; sin embargo, un modelamiento determinístico no considera términos aleatorios debido a su naturaleza matemática; es decir, cada simulación con las mismas entradas producirán invariablemente las mismas salidas. Dentro de la modelación determinística se tiene tres tipos de modelos: empíricos (también llamados cajas negras), agregados y distribuidos.

- Los modelos de caja negra o caja gris se basan en una función de transferencia que realizan procesos hidrológicos sin considerar las leyes que rigen los fenómenos físicos implicado.
- Los modelos hidrológicos agregados son modelos conceptuales que tratan de reproducir los procesos hidrológicos implicados en la transformación lluvia-escurrimiento, también se conocen como modelos que consideran la humedad del suelo. Constan, en general, de una parte de balance de agua, que considera en el tiempo el balance entre lluvia, evaporación, escorrentía y almacenamiento; y una segunda parte de tránsito de los diferentes tipos de escorrentía. Por tanto, pueden modelar en forma continua la respuesta de una cuenca a los eventos de precipitación.
- Los modelos hidrológicos distribuidos, también llamados de base física, son modelos que dividen el área de captación en sub-áreas, a las cuales se le asignan características particulares. Presentan el mayor grado de aproximación a las leyes físicas que rigen los principales procesos en la respuesta hidrológica de una cuenca, así como la variabilidad espacial de los principales factores que intervienen. Se

basan exclusivamente en parámetros físicos, por tanto medibles, con lo cual son directamente aplicables a cuencas no aforadas.

Para Salgado y Güitrón de los Reyes (2012), la aplicación de uno u otro modelo dependerá de los objetivos de la simulación. No necesariamente los modelos hidrológicos distribuidos son la mejor opción; sin embargo, cuando se trata de representar la física de fenómenos hidrológicos en la cuenca, y ante la evidencia de la variabilidad espacial de la precipitación, la temperatura, la cobertura vegetal, entre otros parámetros, es una ventaja el empleo de los modelos hidrológicos distribuidos respecto a los modelos agregados. Sin pasar por alto que los primeros llegan a un notable incremento de complejidad en su aplicación, asociada principalmente, a la cantidad de información requerida para su modelación que se basa en la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en los cuales se procesa gran parte de los datos para representarla fisiografía de la cuenca, aunque esta complejidad es atenuada por el uso de equipo de cómputo que cada vez tiene mayor velocidad y capacidad de almacenamiento.

### **3.6.2. Elección de un modelo hidrológico**

La gran diversidad de modelos hidrológicos complica la elección específica de uno para una aplicación. Con el fin de evitar ciertos inconvenientes o de reducir errores en la simulación es necesario basarse en algunos criterios antes de optar por un modelo:

- **La problemática**, se debe tener claro el objetivo que se quiere llevar a cabo mediante la simulación, teniendo en cuenta todos los factores que afectan el fenómeno a estudiar y la adecuación del modelo a la problemática planteada.
- **La determinación de parámetros**, que se basa en dos aspectos fundamentalmente: la información hidrometeorológica disponible y por otra parte el tamaño y la complejidad de la cuenca hidrográfica. La totalidad de los modelos requieren de eventos hidrometeorológicos simultáneos para asegurar una buena calibración.
- **La regionalización**, la utilización de técnicas de interpolación o de reglas que permitan transponer los parámetros estimados sobre una cuenca “medida” hacia otras cuencas “sin medida”.
- **Las posibilidades de simulación**, es normal proponer análisis de sensibilidad a

parámetros seleccionados lo que implica una utilización repetida del modelo. Algunos modelos ofrecen la posibilidad de funcionar automáticamente de manera iterativa mientras que en otros esta tarea es manual.

- **La facilidad de utilización**, la simplicidad del modelo debe estar basada en el tiempo disponible para el estudio, los datos hidrometeorológicos, el tipo de cuenca hidrográfica y los resultados esperados. Se debe adoptar modelos que utilicen las ideas básicas de modelos antiguos pero que presenten una forma amistosa gracias a los sistemas de interfaz gráfica. Por otro lado, se debe tener en cuenta que las dificultades hidrológicas siguen siendo las mismas, no obstante están camufladas bajo la facilidad de uso del modelo, sin embargo la comprensión de los fenómenos debe ser la prioridad.

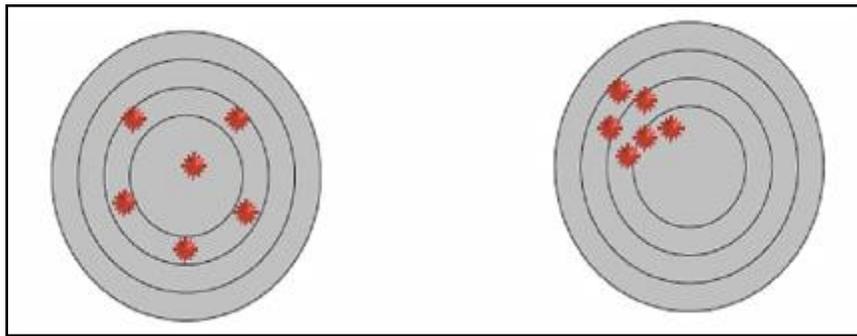
### 3.6.3. Calibración del modelo

El proceso de calibración se centra en minimizar las diferencias entre los datos observados y los datos simulados. Cabrerias (s.f) sostiene que el “criterio de exactitud” se basa en el ajuste de parámetros como medio de calibración. El uso de modelos determinísticos requiere el manejo de términos como: variables de ingreso, parámetros y variables de estado.

- **Variables de ingreso**, son series de datos a la cuales se les aplicará una serie de ecuaciones para intentar representar otra variable. Se asume que estas variables de ingreso son independientes, es decir, no dependen de ninguna otra. Algunos ejemplos son; precipitación, temperatura, etc.
- **Parámetros**, son parámetros del modelo que han sido asumidos constantes, como la conductividad hidráulica del suelo, la rugosidad, etc.
- **Variables de estado**, representan una situación que afectará los resultados del modelo; por ejemplo, el modelado de una cuenca bajo régimen húmedo tiene diferentes características que en régimen seco. Un ejemplo de variable de estado es la humedad de suelo, la cual varía estacionalmente afectando la concentración de escorrentía superficial.

### a. Exactitud y precisión

Dos conceptos importantes a tener en cuenta antes de utilizar modelos hidrológicos son “exactitud” y “precisión”. La exactitud mide la *performance* de un modelo; es decir, la cercanía entre los valores simulados y los observados. Un modelo exacto no arroja los mismos resultados, pero estos se encuentran siempre dentro de un rango alrededor del dato observado. Por otro lado, la precisión mide la *repetibilidad* del experimento; es decir, la similitud entre valores simulados. Un modelo preciso arroja similares resultados, pero estos no son necesariamente cercanos al dato observado. La figura 6 ilustra estos conceptos.



**Figura 6: Exactitud y precisión en mediciones. Izquierda: grupo de medidas consideradas exactas. Derecha: grupo de medidas consideradas precisas**

FUENTE: Molnar, 2011

Estos dos conceptos están relacionados con otros dos: errores aleatorios y errores sistemáticos. Los errores aleatorios son errores propios de fluctuaciones aleatorias de la magnitud medida o del proceso de medición y no son controlables. Debido a que son aleatorios, la medición realizada se encontrará alrededor de la medida real, muy característica de las medidas exactas. Por otro lado, los errores sistemáticos son errores que se repiten permanentemente y aproximadamente en la misma magnitud; esta característica hace que todas las mediciones se encuentren “desviadas” en un mismo valor de la medida real (como las medidas precisas). De esta manera, si se determina el valor sistemático, es fácil corregir la medida y obtener medidas mucho más exactas.

## ***b. Fuentes de incertidumbre***

En general, existen cuatro fuentes principales de incertidumbre:

- ***Errores (sistemáticos o aleatorios) en los datos de ingreso***, son errores propios de los datos de ingreso, los cuales no necesariamente son datos de campo.
- ***Errores (sistemáticos o aleatorios) en los datos observados***, son errores propios de la medición en campo de las diferentes variables hidrometeorológicas que se consideran en el modelo.
- ***Errores debido a valores no óptimos de parámetros***, referido a los errores ocasionados por la asunción de valores de los parámetros del modelo que no son la consecuencia de un proceso de optimización.
- ***Errores debido a la estructura del modelo***, Errores propios del modelo y que no pueden ser eliminados sin modificar la estructura del mismo. El proceso de calibración no los afecta. Las diferencias entre el modelo y la realidad se deben a la combinación de todas estas fuentes.

El proceso de calibración puede minimizar las tres primeras; sin embargo, no altera la cuarta, por este motivo es importante discriminar los efectos de cada fuente de error. Asimismo, la calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utiliza una “función objetivo”. Este proceso puede realizarse de dos formas:

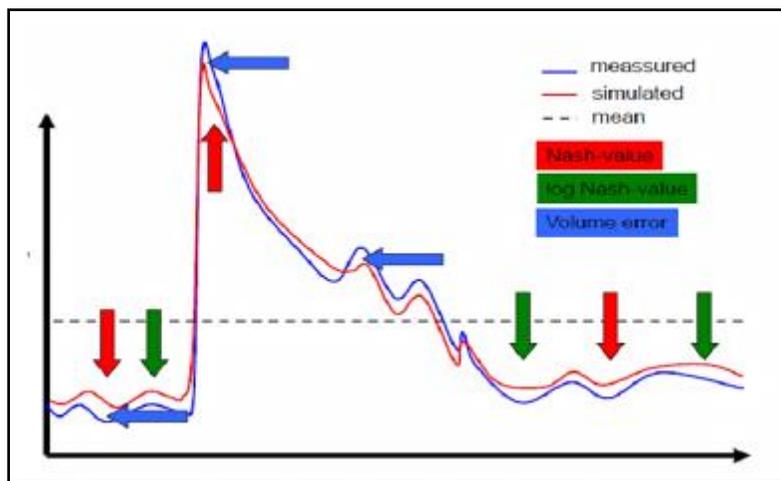
- ***Prueba y error (manual)***, Es el método más utilizado y usualmente recomendado. Implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. Tiene valor de aprendizaje pero es lento y subjetivo.
- ***Automática***, Optimiza los valores de los parámetros utilizando técnicas numéricas. A diferencia de la “prueba y error”, este método es mucho más rápido y objetivo; sin embargo, es numéricamente complejo y presenta problemas en la compensación de errores y en la captura de valores mínimos locales. Algunos ejemplos son: técnicas de escalamiento (*hill-climbing techniques*), recocido simulado (*simulated*

*annealing*), algoritmos genéticos, etc.

### c. *Función Objetivo*

La función objetivo se le denomina también función de criterio o función de error. Es una medida de la distancia entre las observaciones y las simulaciones. Las más simples consisten en diferencia absoluta entre los caudales observados y simulados para un intervalo específico de tiempo, mientras que los más complicados tienen en cuenta todo hidrograma. Entre los parámetros estadísticos más importantes a cuantificar se tiene el coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash), coeficiente de Pearson ( $r$ ), el error medio (MBE), el error cuadrático medio (RMSE) y el error relativo al volumen (%V).

El uso de las funciones objetivo brinda un criterio analítico y objetivo para la definir la calidad de ajuste del modelo; sin embargo, este análisis debe ser complementado con un análisis visual. La Figura 7 se ilustra los conceptos de las medidas de bondad de ajuste más usadas en hidrología.



**Figura 7: Efectos de las medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo**

FUENTE: Finger, 2011

#### 3.6.4. Validación del modelo

Refsgaard y Knuds (1996) definen la validación de un modelo como “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración”. De esta manera, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de

validación muestran errores o límites aceptables. Como se menciona, la validación de un modelo se hace para un lugar determinado pues es imposible, realizar una validación generalizada (así como es imposible realizar una calibración generalizada).

Usualmente, la validez de un modelo para un período diferente al de calibración se asume como verdadera considerando condiciones futura similares a las actuales. Estas asunciones son válidas para casos simples como la completación de datos pues el período desconocido se encuentra “dentro” del período calibrado y las características pueden asumirse iguales, pero este no es el caso general.

Transponer un modelo a condiciones que podrían ser diferentes en el tiempo genera una gran incertidumbre. Para superar esta incertidumbre, Klemes (1986) propone un modelo jerárquico el cual será explicado líneas abajo.

#### ***a. Modelo Jerárquico***

Este esquema de validación es llamado jerárquico porque las tareas son ordenadas de acuerdo a su complejidad y las demandas de las pruebas se incrementan en la misma dirección (Klemes 1986). Las categorías principales para diferenciar la prueba de validación son: condiciones estacionarias (similares al período de calibración), y condiciones no estacionarias (diferentes a las del periodo de calibración).

Cada una de estas categorías se subdivide en dos subgrupos de acuerdo al lugar donde se realizará la simulación: si se realiza en la misma cuenca que fue usada para la calibración, o si se realiza en una cuenca diferente.

#### **3.6.5. Sistema de modelación hidrológica Hec-Hms**

El SMH HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) representa la parte hidrológica de los programas de la familia HEC desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos. Este fue diseñado para simular la respuesta hidrológica de una cuenca a la precipitación, mediante un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos, cada una de los cuales refleja un aspecto del proceso precipitación-escorrentía

dentro de cada Subcuenca, a partir de variables y parámetros físicos e hidrológicos.

#### **a. Simulación continua en Hec-HMS**

Los modelos de simulación hidrológica en Hec-HMS pueden ser de dos tipos:

- *Un modelo de eventos* simula un evento hidrológico concreto: “Este aguacero produciría este hidrograma”. Además, calcula qué parte de la precipitación será precipitación neta, y con ella calcula la escorrentía directa que se genera; el resto de la precipitación (abstracciones o pérdidas) no es considerada luego.
- *Un modelo continuo* intenta simular la evolución de todo el proceso hidrológico. Calcula qué parte de las precipitaciones quedan retenidas superficialmente (intercepción en la vegetación y “charcos”), qué parte se infiltra en el suelo y qué parte genera escorrentía superficial. Pasada la precipitación debe considerar si la precipitación que se almacenó en el suelo se evapotranspira o si se infiltra hacia los acuíferos. Finalmente, desde éstos últimos, puede perderse hacia una percolación profunda (fuera del alcance del modelo) o alimentar los cauces de los ríos.

Un modelo de eventos suele trabajar desde unos minutos a varios días, mientras que en los modelos continuos son habituales periodos desde meses hasta varios años. Adicionalmente a ello, Hec-HMS inicialmente fue un modelo para simular eventos concretos, aunque ahora dispone de métodos que permiten utilizarlo como continuo. Para ello, al caracterizar la subcuenca, y como método de cálculo de pérdidas (loss), debemos utilizar unos de los dos métodos siguientes:

- *Constante y déficit (Déficit and constant)*; es un método para una simulación cuasi- continua que considera solamente el almacenamiento en el suelo como un depósito único en el que se infiltra el agua que no produce escorrentía directa. En periodos de no precipitación, se producirá evapotranspiración utilizando el agua almacenada en el suelo (US Army Corps of Engineers, 2010).
- *Consideración continua de la humedad del suelo (Soil-moisture Accounting)*; es el método más adecuado para utilizar Hec-HMS como modelo continuo. Tiene en cuenta cinco niveles distintos en los que la precipitación puede ser retenida o

almacenada: vegetación, retenciones superficiales, suelo, acuífero superficial y acuífero más profundo (US Army Corps of Engineers, 2010).

### **3.6.6. Sistema de modelación hidrológica R.S-Minerve**

RS MINERVE (Foehn et al., 2014; García Hernández et al., 2014a) es un software hidrológico e hidráulico desarrollado por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin - CREALP conjuntamente con la oficina de ingeniería HydroCosmo SA. y con la colaboración de dos universidades la Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne y la Universidad Politécnica de Valencia los cuales actualmente difunden el software en sus programas de posgrado.

R.S Minerve es un programa de simulación de caudales que permite la modelización de redes hidrológicas e hidráulicas complejas siguiendo un enfoque semi-distribuido. El programa es capaz de representar no sólo los principales procesos hidrológicos tales como la fusión de nieve y glaciar, la escorrentía superficial y sub-superficial, sino también las infraestructuras de regulación como son los diques de retención, los aliviaderos, las tomas de agua, turbinas y bombas, ente otras.

El análisis global de una red hidrológico-hidráulica es indispensable en multitud de casos, como son la planificación o la gestión de los recursos hídricos, la optimización de las operaciones de centrales hidroeléctricas, el diseño de aliviaderos, o el desarrollo de medidas de protección contra inundaciones. RS MINERVE facilita este tipo de análisis gracias a una interfaz de fácil utilización y a sus numerosas funcionalidades, también integra distintos modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía como son GSM, SOCONT, SAC-SMA, GR4J o HBV. La inclusión de estructuras hidráulicas mediante diferentes modelos (reservorios, turbinas, aliviaderos...) permite asimismo la modelización de sistemas hidroeléctricos complejos. Actualmente se utiliza en el sistema operacional de previsión y gestión de avenidas del Cantón de Valais en Suiza.

### ➤ **Modelo Hidrológico HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning)**

El modelo hidrológico HBV es un modelo conceptual y agregado de precipitación esorrentía ampliamente empleado en previsiones hidrológicas y en estudios de balance hídrico, que ha sido aplicado en más de 30 países. Pertenece a la clase de modelos que tratan de abarcar los procesos más importantes de generación de esorrentía empleando una estructura simple y robusta, y un pequeño número de parámetros. Fue originariamente desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para predecir la esorrentía a centrales hidroeléctricas en 1970 (Bergström, 1976; Bergström, 1995), pero el alcance de sus aplicaciones se ha ido incrementando continuamente.

El modelo consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de esorrentía. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual.

## **3.7 ESTUDIOS REALIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO**

Existen diversos estudios realizados en el valle del Mantaro, es por esto que se ha visto oportuno realizar un pequeño resumen de la información existente en la zona de estudio para que de una u otra manera evitar la duplicidad de la investigación o en su efecto tomar como base los resultados obtenidos en dichos estudios.

### **3.7.1. Geología y Suelos**

#### **a. Geología**

En base al mapa geológico del cuadrángulo de Jauja (24-m), desarrollado por el INGEMMET (1994), la geología local de la cuenca Anya está conformada por unidades litoestatigráficas como la formación Concepción, la Formación Chambara, terrazas fluvioglaciares, 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 Chambara, la formación Aramachay, la formación Condorsinga, la Formación Jauja y la formación Concepción. La distribución espacial de

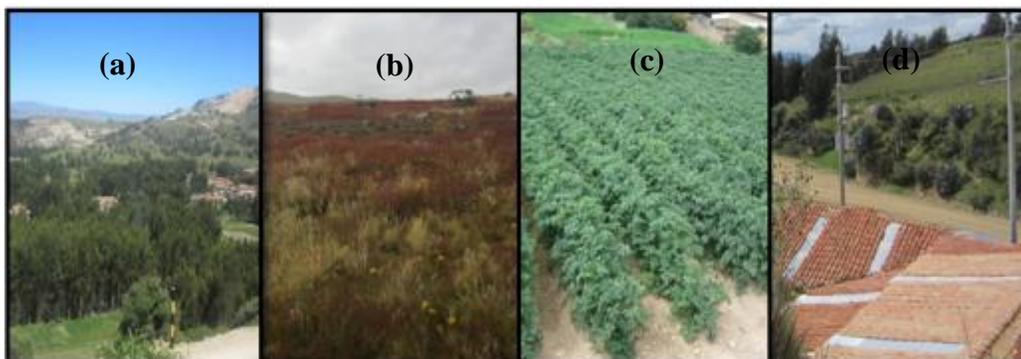
cada una de las unidades litoestratigráficas y rocas ígneas mencionadas, son mostradas en el Mapa 4.

## **b. Suelos**

Según el estudio de “Primera aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelo agrícola en el valle del Mantaro” (IGP, 2010) los suelos de la cuenca Anya están conformados, principalmente por arenas y arcilla; variando espacialmente su clasificación textural de franco-arenosa a franco-arcilloso-arenosa. Del mismo modo, los suelos presentan un pH que varía, espacialmente, entre 3.8 a 6.6 lo cual muestra predominancia de suelos alcalinos. Además, el porcentaje de materia orgánica (MO) de los suelos varía entre 1.7 a 5.9%, para suelos del distrito de Quilcas y Saño respectivamente. Por otro lado, los suelos de la cuenca Mchique están conformados, principalmente, por arenas y limos; variando espacialmente su clasificación textural de franco-arcillosa a franco-arcilloso-arenosa. Los suelos presentan un pH que varía, espacialmente, entre 4.9 a 7.9, correspondiente a suelos alcalinos y otros ligeramente ácidos. Asimismo, el porcentaje de materia orgánica (MO) de los suelos varía entre 3.06 a 6.69%.

### **3.7.2. Cobertura y uso de suelos**

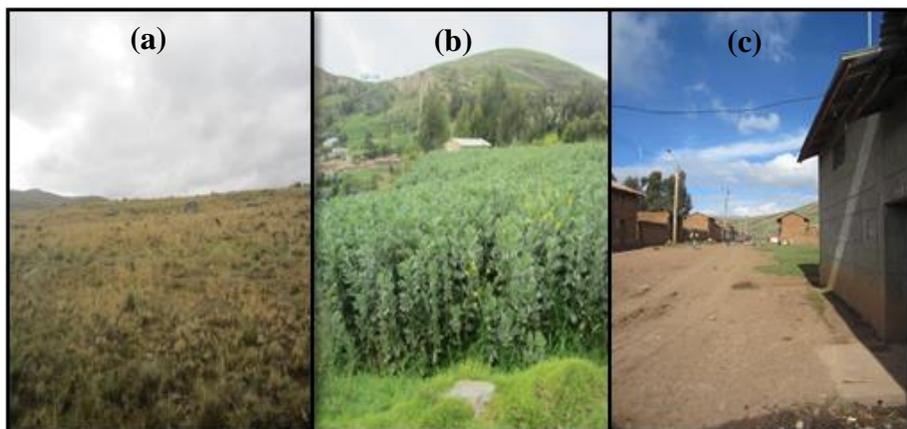
Grados (2012) señala que las coberturas y usos de suelo predominantes en la cuenca Anya están clasificadas como césped de puna (pajonal) y áreas agrícolas, las cuales representan aproximadamente el 42.71 y 42.03% del total de la cuenca. Asimismo, el área ocupada por bosques ocupa un 9.88%, mientras que el área urbana sólo un 5.38% del total. La figura 8 muestra cada una de las coberturas y usos de la cuenca Anya.



**Figura 8: Cobertura y uso de suelo de la cuenca Anya: (a) Bosques, (b) Pajonal, (c) Agrícola y (d) Población**

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, las coberturas de suelo predominantes en la cuenca Mchique fueron clasificadas como: césped de puna (pajonal) y áreas agrícolas, las cuales representan aproximadamente el 56.29% y 43.39% del total de la superficie de la cuenca; mientras que el área urbana ocupa sólo un 0.32%. La figura 9 muestra cada una de las coberturas y uso de suelo de la cuenca Mchique.



**Figura 9: Cobertura y uso de suelo de la cuenca Mchique: (a) Pajonal, (b) Agrícola y (c) Población**

Fuente: Elaboración propia

### **3.7.3. Clima**

Las cuencas Anya y Mchique están sujetas a temperaturas que fluctúan entre 4.2 y 20 °C, así mismo el clima del valle del Mantaro es templado seco y está caracterizado por tener dos estaciones fuertemente marcadas según el régimen de humedad, la estación seca (Mayo-Octubre) y la estación húmeda (Noviembre-Abril), tal como se aprecia en las Fotos 15-18 del Anexo 4.

### **3.7.4. Máximas avenidas en los ríos Anya y Mchique**

Según Grados (2012), los caudales máximos ocurridos en los ríos Anya y Mchique llegan a valores de 3.57 y 1.94 m<sup>3</sup>/s (periodo 2004-2010), representando un potencial peligro para la población, debido a desbordes, daños a la propiedad y al integridad física de la población aledaña a la margen de ambos ríos. La figura 10 muestra las diferencias morfológicas de los ríos Anya y Mchique.



**Figura 10: Ríos principales de las cuencas en estudio: (a) Río Anya y (b) Río Mchique**  
FUENTE: Elaboración propia

### **3.7.5. Balance hídrico superficial de las cuencas Anya y Mchique.**

Según Llauca (2014) las áreas bajo riego podrían incrementarse a corto plazo (2017), de 434.28 a 1191.37 ha para la cuenca Anya, y de 154.04 a 656.03 ha para la cuenca Mchique; considerando la actual eficiencia de riego del 30%. A mediano plazo (2022), elevando la eficiencia de riego a 45%, las áreas bajo riego se incrementarían a 1391.13 ha para la cuenca Anya, y 799.81 ha para la cuenca Mchique. Sin embargo, a largo plazo (2050), teniendo en cuenta la disminución de la precipitación en 19% (IGP, 2005), y de mantenerse la actual eficiencia de riego del 30%, las áreas regadas disminuirían a 1178.98 ha para las cuencas Anya, y 622.22 ha para la cuenca Mchique; mientras que de elevarse al 45%, podrían incrementarse a 1385.63 ha para la cuenca Anya, y 712.38 ha para la cuenca Mchique.

En base a los escenarios futuros simulados y a la situación actual, Llauca (2014) demuestra que existe suficiente disponibilidad hídrica a corto, mediano y largo plazo, lo cual permitirá generar proyectos de irrigación de nuevas tierras destinadas a la agricultura, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. MATERIALES

#### 4.1.1. Ubicación y descripción de la zona de estudio

Las cuencas de los ríos Anya y Mchique se encuentran políticamente ubicadas en el Departamento de Junín, entre las Provincias de Jauja, Concepción y Huancayo. La Tabla 4 muestra a detalle la localización política de las cuencas en estudio.

**Tabla 4: Ubicación política de las cuencas Anya y Mchique**

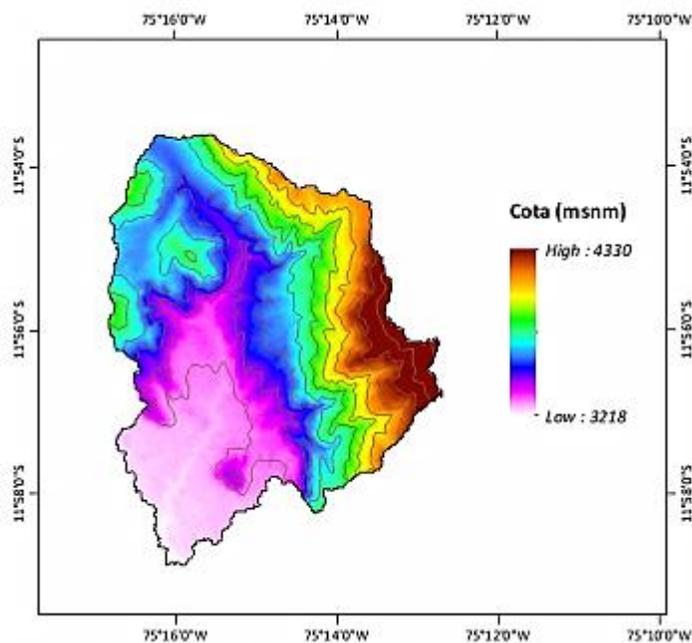
Cuenca	Departamento	Provincia	Distrito
Anya	Junín	Concepción	Ingenio
		Huancayo	Quilcas
			Saño
Mchique	Junín	Jauja	Sincos

FUENTE: Elaboración propia

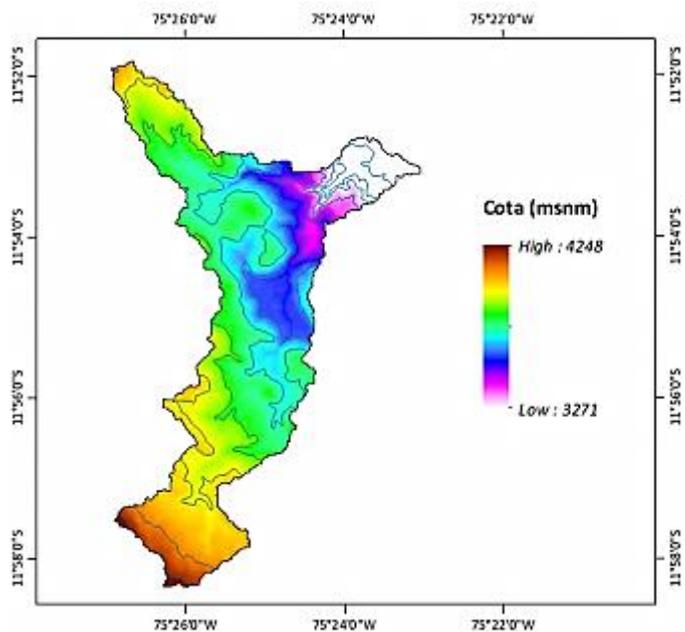
Geográficamente, la cuenca del río Anya se sitúa en la margen izquierda del río Mantaro, entre los paralelos 11.98°-11.89° latitud sur y los meridianos 75.28°-75.21° longitud oeste. Por otro lado, la cuenca del río Mchique se ubica en la margen derecha del río Mantaro, entre los paralelos 11.97°-11.86° latitud sur y los meridianos 75.45°-75.38° longitud oeste. Un mapa con mayor detalle respecto a la ubicación de la zona de estudio y la accesibilidad vial de esta se encuentra en el Mapa 1.

Las características topográficas y altimétricas de las cuencas Anya y Mchique, pueden ser apreciadas en las Figuras 11 y 12; estas cuencas presentan tres tipos de relieves: plano o llanura en la parte baja de la cuenca donde están asentadas la población urbana, colinas en

donde se siembra la papa nativa y finalmente un relieve montañoso; además ambas cuencas presentan una topografía accidentada, Anya (60% aproximadamente) y Mchique (75% aproximadamente).



**Figura 11: Altimetría de la cuenca del río Anya**  
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 12: Altimetría de la cuenca del río Mchique**  
FUENTE: Elaboración propia

#### **4.1.2. Información cartográfica**

Como fuente cartográfica se utilizó la carta nacional 24-m (Jauja) desarrollado por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) con escala 1:100 000, la cual fue digitalizada para su procesamiento. Asimismo, para determinar las características fisiográficas de las cuencas y parámetros de entrada en el modelo precipitación-escorrentía HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System), se empleó el MDE (Modelo Digital de Elevación) ASTER GDEM 2 de la NASA que cuenta con una resolución de 30m y la carta nacional digitalizada.

Para la identificación de la cobertura vegetal y usos del suelo se utilizó el Mapa 2; en donde se detallan las diferentes coberturas y sus distribuciones en las cuencas de estudio.

#### **4.1.3. Información geológica**

Como fuente de información de la geología local se utilizó el mapa geológico del cuadrángulo de Jauja (24-m), desarrollado por el INGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú) con escala 1:100 000, la cual fue digitalizada para su procesamiento.

Para la descripción de la geología local de las cuencas en estudio se utilizó el Mapa 3; en donde se detallan las diferentes unidades litoestratigráficas y sus respectivas distribuciones en las cuencas de estudio.

#### **4.1.4. Información pluviométrica**

La información pluviométrica utilizada en el estudio fue directamente recolectada mediante las estaciones pluviométricas y meteorológicas, automáticas, instaladas en las cuencas en estudio, considerando las recomendaciones de la World Meteorology Organization (WMO). La información fue recolectada mensualmente, para el período de estudio Diciembre 2013 – Marzo 2015. El Mapa 4, presentado en los Anexos, muestra en forma detalla la ubicación de cada una de las estaciones pluviométricas y meteorológicas.

A continuación se detalla la ubicación de las estaciones situadas en la cuenca del río Anya.

**Tabla 5: Ubicación de estaciones pluviométricas y meteorológicas en la cuenca Anya**

<b>Estación</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Altura</b>	<b>Tipo</b>
Tambo	75.23°O	11.92°S	4097 msnm	Pluviométrica
Colpar	75.25°O	11.92°S	3509 msnm	Meteorológica
Quilcas	75.26°O	11.93°S	3355 msnm	Meteorológica

FUENTE: Elaboración propia

A continuación se detalla la ubicación de las estaciones situadas en la cuenca del río Mchique.

**Tabla 6: Ubicación de estaciones pluviométricas y meteorológicas en la cuenca Mchique**

<b>Estación</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Altura</b>	<b>Tipo</b>
Cruzpampa	75.43°O	11.92°S	3894 msnm	Meteorológica
Chacrapa	75.40°O	11.90°S	3619 msnm	Meteorológica
Sincos	75.38°O	11.89°S	3328 msnm	Pluviométrica

FUENTE: Elaboración propia

#### **4.1.5. Información hidrométrica**

La información hidrométrica fue obtenida a partir de los niveles diarios de los ríos Anya y Mchique registrados para el estudio (Diciembre 2013 - Marzo 2015), a partir de la instalación previa de reglas limnimétricas. Posteriormente, se instalaron dos registradores automáticos (*dataloggers – diver*) que permitieron el registro de los niveles de los ríos principales Anya y Mchique, para intervalo de registro de cinco minutos.

A continuación se presenta la ubicación detallada de las estaciones hidrométricas en las cuencas en estudio.

**Tabla 7: Ubicación de estaciones limnimétricas**

<b>Estación</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Altura</b>	<b>Tipo</b>
Anya	75.26°O	11.95°S	3279 msnm	Limnimétrica
Mchique	75.40°O	11.89°S	3350 msnm	Limnimétrica

FUENTE: Elaboración propia

Además, se detalla la ubicación de los equipos *divers* instalados en los ríos principales de las cuencas Anya y Mchique.

**Tabla 8: Ubicación de equipos diver en las cuencas en estudio**

Estación	Longitud	Latitud	Altura	Tipo
Diver Anya	75.26°O	11.95°S	3279 msnm	Datalogger
Diver Mchique	75.40°O	11.89°S	3350 msnm	Datalogger

FUENTE: Elaboración propia

Las estaciones limnimétricas se calibraron mediante aforos periódicos en épocas de estiaje y avenida lo cual permitió obtener los caudales a partir de las escalas registradas. La ubicación de la estaciones limnimétricas se detalla en el Mapa 4.

#### 4.1.6. Materiales, equipos y programas de cómputo

##### a. Equipos

###### *Equipos de campo*

###### - **Global Water Flow Probe FP111**

Instrumento para la medición de la velocidad de flujo (correntómetro) con capacidad para la obtención instantánea máxima, mínima y promedio de la celeridad. El equipo consiste en un sensor que recibe la señal eléctrica proporcionada por la rotación de la hélice, esta señal es amplificada y convertida en la lectura expresada en  $\frac{m}{s}$  en la pantalla LCD del equipo.

El rango de medición es de  $0.1 - 6.1 \frac{m}{s}$  y cuenta con una precisión de  $0.1 \frac{m}{s}$ .

Posee un registrador de datos incorporado que permite la grabación de 30 mediciones realizadas.



**Figura 13: Correntómetro FP111**

FUENTE: Elaboración propia

- **RG3-M Rain Gauge**

Equipo meteorológico para el registro continuo de la temperatura y la precipitación. Dotado de un registrador de datos registra hasta 3200 *mm* de precipitación que pueden ser utilizados para determinar la intensidad y la duración. Posee un diámetro de 15.24 cm, cuenta con una resolución de 0.2 *mm* y un umbral máximo para la intensidad de 1270  $\frac{mm}{h}$ . El tipo de pluviómetro es el *tipping-bucket*.

Para almacenar la información es necesario el Pendant Event Data Logger y para la extracción de esta el Optic USB Base Station. Asimismo se requiere del software HOBOWare 3.0 para la descarga y manipulación de la información.



**Figura 14: Estación pluviométrica RG3-M**

FUENTE: Elaboración propia

- **WatchDog 120 Rain Gauge**

Equipo pluviométrico que juntamente con el registrador de datos WatchDog Data Logger 450 y sensores específicos permite el registro continuo de la radiación solar, humedad relativa y temperatura. Posee una capacidad de 15000 mediciones, es decir 3750 por variable. Cuenta con una pantalla LCD para la verificación del registro continuo de los datos.

El pluviómetro WatchDog 120 cumple con los protocolos de la Organización Meteorológica Mundial teniendo un diámetro de 20.5 cm. El registrador de datos se encuentra dentro del pluviómetro y acumula la precipitación en cada intervalo, teniendo como umbral máximo de 65 mm por intervalo. La precisión es de  $\pm 2\%$  @ 2.54 mm por

hora. El tipo de pluviómetro es el *tipping-bucket*.

Se requiere del software SpecWare 8.0 para la descarga y manipulación de la información.



**Figura 15: Estación minimeteorológica WatchDog 120**

FUENTE: Elaboración propia

- **Wireless Vantage Pro2™ Plus (4)**

Equipo meteorológico acoplado con sensores para el registro de: temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación, presión barométrica, radiación solar y radiación UV.

El pluviómetro posee un diámetro de  $16.5\text{ cm}$  y cuenta con una resolución de  $0.2\text{ mm}$ . El intervalo de registro para las variables es de 30 minutos. Por otro lado posee la certificación de la Organización Meteorológica Mundial.

Es necesaria para su funcionamiento la Vantage Pro2 Console en cuya pantalla LCD se puede apreciar el registro de la información en tiempo real. Para la descarga y manipulación de la información es necesario el software Weather Link 5.9.2.



**Figura 16: Estación meteorológica Wireless Vantage Pro2™ Plus**

FUENTE: Elaboración propia

- **Mini Diver D501 (2)**

Es un equipo que mide la presión absoluta, la cual consta de la presión de columna de agua y la presión atmosférica, es fabricado con un revestimiento de acero inoxidable (316 L) con un diámetro de 22 *mm* . El Mini-Diver puede almacenar un máximo de 24,000 mediciones (de presión y temperatura).

De peso aproximado de 70 *gr*. Soporta una columna de agua de hasta 10 *m* y su batería le permite una duración de 10 años bajo el agua. Posee una precisión de medición de  $\pm 0.25\%$  FS y una resolución de 0.2 *cm* H<sub>2</sub>O

Para la extracción de la información es necesario el Diver USB Reading unit Type AS330, mientras que para la descarga de datos es necesario el software del fabricante, Diver Office 2013.

Para la obtención de los niveles de agua, mediante la compensación de presiones, es necesario utilizar adicionalmente el Baro Diver D500.



**Figura 17: Registrador automático Diver D501**

FUENTE: Elaboración propia

- **Baro Diver (2)**

Este Diver mide la presión atmosférica y se utiliza para compensar las variaciones en la presión atmosférica medidas por otros Divers. El revestimiento de acero inoxidable (316 L) tiene un diámetro de 22 mm.

Su batería incorporada le permite una duración de 10 años. Posee una precisión de medición de  $\pm 2 \text{ cm H}_2\text{O}$  y una resolución de  $0.1 \text{ cm H}_2\text{O}$ . y soporta un presión máxima de  $15 \text{ m H}_2\text{O}$ . Para la extracción de la información es necesario el Diver USB Reading unit Type AS330, mientras que para la descarga de datos es necesario el software del fabricante, Diver Office 2013.



**Figura 18: Registrador automático Baro-Diver**

FUENTE: Elaboración propia

- **GPSMAP 60CSx (1)**

Equipo para el posicionamiento que cuenta con altímetro y compás entre las funciones más importantes. Permite la grabación de 1000 puntos y 50 rutas con 250 puntos por ruta. La precisión en planimetría es menor a  $10 \text{ m}$ , en altimetría es de  $0.3048 \text{ m}$  y para el compás es de  $\pm 2^\circ$ . Cuenta con un formato de posición en coordenadas geográficas (latitud-longitud)

o totales (UTM) y puede llegar a utilizar hasta 12 satélites para calcular la posición ya que cuenta con 12 canales SiRFstar III™.

Se requiere del software MapSource 6.16.3 para la descarga de información de los datos recolectados.



**Figura 19: GPS Garmin MAPS 60Csx.**

FUENTE: Elaboración propia

- **Equipo Fieldscout TDR 300**

Este equipo es un medidor de humedad de suelo, que cuenta con la tecnología de la reflectometría de dominio del tiempo, con la cual mide de manera rápida y precisa el contenido volumétrico del agua en el suelo (o algunos otros sustratos).

Entre las principales características de este equipo es que el registrador tiene una capacidad de 2700 lecturas con lo cual nos evitamos de apuntarlos de manera manual, el rango de medición va de 0 % a saturación (saturación por lo general alrededor de 50% de agua volumétrica), la precisión de la lectura es de  $\pm 3\%$  de contenido volumétrico de agua con conductividad eléctrica  $< 2\text{dS m}^{-1}$  y la profundidad de las varillas son de 12 cm ó 20 cm (en la presente investigación se usó la de 12 cm).



**Figura 20: Fieldscout TDR 300**

FUENTE: Elaboración propia

- **Cámara fotográfica Canon PowerShot ELPH 100 HS**

***Equipos de gabinete***

- Laptop Lenovo Z470, procesador Intel Core i3, memoria RAM de 4GB.
- Impresora Epson Stylus TX210.

**b. Programas de cómputo y materiales**

- Microsoft Office 2010.
- ArcGis 10.2.
- R versión 2.15.1.
- Hec-HMS 3.5.
- RS-Minerve 1.3.1.4
- Materiales de escritorio.

**4.2. MÉTODOS**

**4.2.1. Hidrometeorología**

***4.2.1.1.Extrapolación logarítmica***

Es un método de calibración de estaciones limnimétricas universalmente desarrollado gracias a su simplicidad, esta se basa en la experiencia demostrada de que la curva de descarga queda representada por una parábola de orden superior, cuya expresión se muestra en la ecuación 11.

$$Q = a * (H - Ho)^b \quad (11)$$

Dónde:

$Q$  : Caudal ( $\frac{m^3}{s}$ ).

$a, b$  : Constantes propias de la expresión analítica.

$H$  : Altura de la escala hidrométrica para el cual se quiere conocer ( $m^3$ ).

$Ho$  : Altura de la escala hidrométrica para la cual  $Q = 0 \frac{m^3}{s}$ .

Los valores a obtenerse por el ajuste del método son los de  $Ho$ ,  $a$  y  $b$ .

Para comprobar que esto se cumpla, se debe graficar los caudales aforados y sus escalas limnimétricas en un papel logarítmico y verificar que la gráfica tenga una tendencia lineal. Para esta tarea se puede realizar ensayos sucesivos del valor de  $h_0$  que puede representar un porcentaje de  $h$  o un valor de la escala limnimétrica lo suficientemente bajo que cubra el lecho del río. El valor  $a$  es calculado a partir de la intercepción con el eje de las ordenadas de la regresión lineal de los datos graficados, aceptando como valor de  $a$  al antilogaritmo de este valor. El valor de  $b$  es la pendiente de la regresión lineal obtenida.

Si el alineamiento de la gráfica es correcto, se puede proceder a extrapolar los valores de las escalas limnimétricas mediante la expresión exponencial vista en la ecuación 11.

La extrapolación logarítmica permitió la construcción de las respectivas curvas de calibración de las estaciones hidrométricas Anya y Mchique, para el periodo de estudio Diciembre 2013 – Marzo 2015.

#### ***4.2.1.2. Procesamiento hidrométrico***

La información hidrométrica de las cuencas Anya y Mchique fue obtenida, para el periodo de estudio Diciembre 2013 – Marzo 2015, a partir del registro de los niveles de la superficie del río Anya y Mchique respecto a una superficie de referencia en la cual se considere los  $Q_i = 0$ . Posteriormente, dicho registro permitió la obtención de caudales medios diarios mediante el método de extrapolación logarítmica.

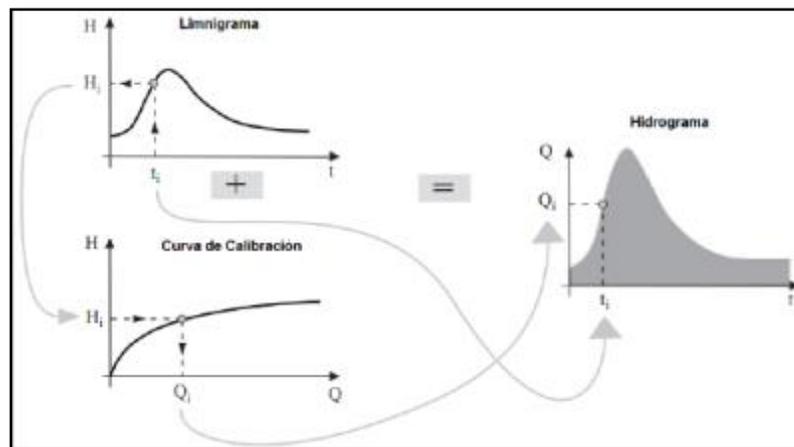
El registro de los niveles de la superficie de los ríos Anya y Mchique, para el periodo de estudio Diciembre 2013 – Marzo 2015, se realizó a través de la lectura de las reglas limnimétricas previamente instaladas en los ríos en estudio. Dichos registros fueron realizados teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se realizaron tres lecturas diarias de las reglas limnimétricas; a las 7, 17 y 22 horas de cada día.

- A fin de controlar la veracidad de la información en las lecturas, se tomó fotografías para cada lectura realizada, esto como medida de control de datos; ello, a fin de cotejar las fotografías tomadas con las hojas de registro.
- La limpieza del cauce de los ríos fue controlada diariamente, para evitar el estancamiento de las aguas en el tramo correspondiente a las estaciones hidrométricas; a fin de reducir errores en la toma de lecturas.

Posteriormente, dos registradores automáticos en los ríos Anya y Mchique fueron instalados en Diciembre de 2012; ello, con la finalidad de obtener mayor densidad de la información hidrométrica. Dichos datos fueron contrastados con las lecturas diarias de las reglas limnimétricas, con la finalidad correlacionar ambos registros y validar los datos.

Teniendo un registro de las escalas limnimétricas medidas en los ríos, se procedió a aplicar la correspondiente ecuación de calibración para estación limnimétrica, lo que nos permitió transformar dichas medidas a caudales, de forma tal que tengamos un registro observado de la escorrentía de Diciembre 2013 – Marzo 2015. La Figura 21 muestra este procedimiento.



**Figura 21: Hidrograma mediante las lecturas de escala y su curva de calibración**

FUENTE: Hydrology (Musy et al., 2011)

#### 4.2.1.3. Procesamiento pluviométrico

La obtención de la información pluviométrica y su procesamiento se realizó teniendo en cuentas las siguientes consideraciones:

- El registro automático de los pluviómetros correspondió a un intervalo de registro de 15 minutos.
- La descarga de datos fue realizada mensualmente, por estaciones ubicadas en una misma cuenca hidrográfica.
- El procedimiento de descarga de la data comprendió: verificación de la correcta configuración de los registradores automáticos y de los niveles de batería de estos, así como también el visto bueno de los pluviométricos, para el registro de los siguientes meses.

#### ***4.2.1.4. Evapotranspiración potencial***

Existen varias ecuaciones analíticas y empíricas que son usualmente usadas para calcular la evapotranspiración de referencia (*Eto*) usando uno o más factores climáticos. El *California Irrigation Management Information System* (CIMIS), elaboró la ecuación de Penman Modificado, también conocida como la ecuación CIMIS Penman.

La ecuación CIMIS Penman usa la ecuación de Penman Monteith y adiciona una función del viento que fue desarrollada en la Universidad de California, USA. El método CIMIS Penman usa el promedio horario de la data climática como valor de entrada para calcular el valor de la *Eto* a nivel horario. Finalmente, la suma de los valores horarios de *Eto* para las 24 horas (medianoche a medianoche) da lugar a la estimación de la *Eto* diaria.

La metodología para calcular la *Eto* a nivel diario se explica a continuación:

VARIABLES CLIMÁTICAS DE ENTRADA REQUERIDAS,

*ea* : Media horaria de la presión de vapor (*kPa*)

*RH* : Media horaria de la humedad relativa (%)

*Rn* : Media horaria de la radiación solar neta  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

*T* : Media horaria de la temperatura del aire ( $^{\circ}C$ )

*U* : Media horaria de la velocidad del viento a 2 metros de la superficie  $\left(\frac{m}{s}\right)$

*Z* : Elevación de la estación meteorológica (*m.s.n.m.*)

Determinar la media horaria de la presión de saturación de vapor, mediante la siguiente expresión:

$$es = 0.6108 \left( \frac{17.27T}{T+237.3} \right) \quad (12)$$

Determinar el déficit medio horario de la presión de vapor (VPD), mediante la siguiente expresión:

$$VPD = es - ea \quad (13)$$

Determinar la pendiente de vapor de saturación vs. la curva de temperatura del aire, mediante la ecuación 14:

$$DEL = \frac{4099es}{(T+237.3)^2} \quad (14)$$

Determinar la presión barométrica media horaria, mediante la ecuación 15:

$$P = 101.3 - 0.0115Z + 5.44 \cdot 10^{-7} \cdot Z^2 \quad (15)$$

Determinación de la constante psicométrico GAM (*psychrometer constant*) en  $\left( \frac{kPa}{C^\circ} \right)$ , mediante la ecuación 16:

$$GAM = 0.000646(1 + 0.000946T)P \quad (16)$$

Determinación de la función de ponderación  $W$  (*weighting function*), mediante la ecuación 17:

$$W = \frac{DEL}{DEL+GAM} \quad (17)$$

Determinación de la función del viento  $FU_2$ , mediante la ecuación 18 y la ecuación 19:

Para  $Rn \leq 0$  (*night time*)

$$FU_2 = 0.125 + 0.0439U \quad (18)$$

Para  $Rn > 0$  (*day time*)

$$FU_2 = 0.030 + 0.0576U \quad (19)$$

Convertir la media horaria de la radiación neta, de  $\frac{W}{m^2}$  a  $mm$ , mediante la ecuación 20:

$$NR = \frac{Rn}{[694.5 \cdot (1 - 0.000946T)]} \quad (20)$$

Calcular la  $Eto$  horaria, la cual es aproximadamente igual a  $RET_i$ , mediante la ecuación 21:

$$RET_i = W \cdot [NR + (1 - W)(VPD \cdot FU_2)] \quad (21)$$

Finalmente, se calcula el valor de la  $Eto$  diaria, la cual es igual a la sumatoria de los valores horarios de la  $RET$  ( $mm$ ), para las 24 horas, mediante la ecuación 22:

$$Eto_{diaria} = \sum_{i=1}^{24} RET_i \quad (22)$$

Los valores de evapotranspiración potencial diaria de las cuencas Anya y Mchique, fueron calculados a partir de la data climática registrada por las estaciones meteorológicas automáticas Quilcas, Colpar, Chacrampa y Cruzpampa para el periodo Diciembre 2013 – Marzo 2014, ubicadas en las cuencas Anya y Mchique, respectivamente.

#### **4.2.2. Humedad del suelo**

Para la obtención de la información de humedad de suelo de ambas cuencas se usó el método dieléctrico de reflectometría de dominio del tiempo (TDR), para esto se tuvo las siguientes consideraciones:

- Mediante un recorrido previo de las cuencas se hizo un mallado para ubicar los puntos de humedad, esto con el fin de abarcar la mayor área de la cuenca, tanto la parte baja como alta; la topografía en ambas cuencas influyó de manera significativa para esta labor.
- La cuenca Anya tuvo un total de 11 puntos, y la cuenca Mchique un total de 10 puntos de muestra de humedad, en cada punto se tomaron 5 repeticiones y se consideró el promedio como dato final.
- Las mediciones de humedad se hicieron a una profundidad de 12 cm ya que según diversos estudios, en los primeros 15 cm de profundidad se encuentra la mejor relación entre la precipitación, humedad de suelo y escorrentía superficial (He et al. 2011), (Gautam et al., 2000); y una vez al mes para ambas cuencas, esto debido principalmente al tiempo con el que se contaba en campo y al costo que involucraba esta labor.

Cabe mencionar que la presente investigación tuvo un monto asignado por el proyecto VLIR y es en base a ese monto que se decidió el número de puntos de monitoreo de humedad y las mediciones una vez al mes, considerando el periodo de Diciembre 2013 - Marzo 2015 como óptimo para poder demostrar la influencia de la humedad del suelo en la relación de precipitación-escorrentía.

- **Mapas de humedad**

La realización de los mapas de humedad se hizo mediante el software Argis y usando el método de interpolación de spline de tensión, esto debido a que este método se ajusta más a nuestros objetivos ya que nos permite tener valores más restringidos y de acuerdo al rango de datos de nuestra muestra.

Estos mapas se trabajaron en primera instancia a nivel de subcuenca ya que los SMH Hec Hms y R.S Minerve, solo nos brindan resultados de simulación de la humedad del suelo a nivel de subcuenca, posteriormente se sumó los resultados de multiplicar el valor de la humedad de cada subcuenca por su área y finalmente se le dividió por el área total de la cuenca, obteniendo así un valor promedio de humedad del suelo a nivel de cuenca.

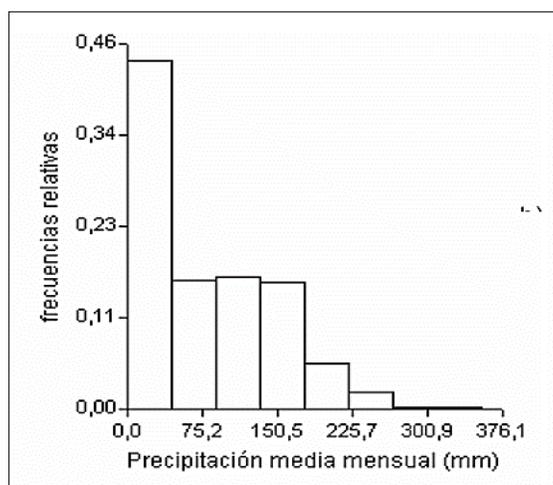
#### 4.2.3. Análisis exploratorio de datos

El Análisis Exploratorio de Datos (AED) permite realizar una mirada interna de los datos y establecer su estructura y relaciones existentes; evitando, de esta forma, un filtrado en el cual pueda dejarse por fuera información importante. Las técnicas usadas generalmente son gráficas con algunas evaluaciones cuantitativas.

El AED de la data hidrometeorológica diaria de las cuencas Anya y Mchique, período Diciembre 2013 – Marzo 2015, fue realizado siguiendo la metodología mostrada a continuación:

##### a. Gráfico de histogramas

El propósito del histograma es el de resumir gráficamente la distribución del conjunto univariado de datos. Este tipo de gráficos muestran en relación a los datos: (a) el centro, (b) la dispersión, (c) la asimetría, (d) la presencia de valores atípicos y (e) la ocurrencia de múltiples modas, que son utilizados como indicadores del modelo de distribución apropiado para los datos. La Figura 22 muestra un histograma característico.



**Figura 22: Gráfico de Histograma**  
FUENTE: CAZALAC Y PHI/UNESCO,s.f.

Las gráficas de distribución de frecuencias o histogramas para las series de precipitación total diaria (*Tambo, Colpar, Quilcas, Cruzpampa, Chacrampa y Sincos*), para las series de evapotranspiración potencial diaria (*Quilcas, Colpar, Chacrampa y Cruzpampa*), y para los datos de humedad de suelo fueron elaboradas para el periodo Diciembre 2013 – Marzo 2015.

#### **b. *Estadísticas descriptivas***

Una vez realizado el AED gráfico para cada una de las series de precipitación, caudales y evapotranspiración; se procedió a determinar las estadísticas descriptivas de cada una de las series antes mencionadas, la cual consistió en el cálculo de las medidas de centralización (media, mediana, moda) y medidas de dispersión (desviación estándar y varianza).

#### ***Medidas de tendencia central***

- ***Media***, representa el promedio de los valores de la serie analizada. Además, es afectado los valores extremos de la data.
- ***Mediana***, representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados. Asimismo, es el valor central en caso de que el número de valores a tomar sea impar, o los dos centrales si son pares.
- ***Moda***, representa el valor con una mayor frecuencia en una distribución de datos.

#### ***Medidas de centralización***

- ***Desviación estándar***, es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética.
- ***Varianza***, es definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de variable analizada respecto a su media.

#### **4.2.4. Geomorfología**

Los parámetros geomorfológicos de una cuenca pueden clasificarse en: parámetros de relieve, parámetros de forma y parámetros de la red de drenaje. A continuación, se presentan los parámetros considerados en el estudio geomorfológico de las cuencas Anya y Mchique.

- ***Parámetros de relieve***

- ***Área de la cuenca***

El área de la cuenca ( $km^2$ ) es probablemente la característica geomorfológica más importante para el diseño. Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural.

- ***Perímetro de la cuenca***

El perímetro de la cuenca ( $km$ ) o la longitud de la línea de divorcio de la cuenca es un parámetro importante, pues en conexión con el área nos puede decir algo sobre la forma de la cuenca. Usualmente este parámetro físico es simbolizado por la mayúscula P.

- ***Pendiente media de la cuenca***

Este parámetro es de importancia pues brinda un índice de la velocidad media de la escorrentía y su poder de arrastre y erosión sobre la cuenca.

- ***Altura media ponderada de la cuenca***

La elevación promedio en una cuenca tiene especial interés en zonas montañosas pues nos puede dar una idea de la climatología de la región, basándonos en un patrón general climático de la zona. La elevación promedio está referida al nivel del mar. Este valor puede ser encontrado usando la curva hipsométrica o el histograma de frecuencias altimétricas. Puede estimarse 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.

- ***Altura máxima y mínima***

Está referida a la cota mínima y máxima de las cuencas, generalmente la cota mínima corresponde al punto de aforo de la cuenca.

- **Rectángulo equivalente**

El principio del rectángulo equivalente es suponer que el escurrimiento de una cuenca se aproxima al de un rectángulo de igual área, igual coeficiente de compacidad y misma repartición hipsométrica, además de suponer que la distribución del suelo, vegetación y densidad de drenaje se encuentran diferenciadas por las áreas comprendidas entre curvas de nivel. Además, el rectángulo equivalente es una transformación puramente geométrica de la cuenca en un rectángulo de igual perímetro, convirtiéndose las curvas de nivel en rectas paralelas al lado menor.

El lado mayor (L) rectángulo equivalente es calculados mediante la ecuación 23, mientras que el menor (l) del rectángulo es calculado mediante la ecuación 24:

$$L = \frac{Cc\sqrt{A}}{1.128} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{Cc}\right)^2} \right] \quad (23)$$

$$l = \frac{Cc\sqrt{A}}{1.128} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{Cc}\right)^2} \right] \quad (24)$$

Dónde:

Cc : Coeficiente de compacidad.

A : Área de la cuenca ( $km^2$ )

- **Curva hipsométrica**

Esta curva representa el área drenada variando con la altura de la superficie de la cuenca. También podría verse como la variación media del relieve de la cuenca.

La curva hipsométrica se construye llevando al eje de las abscisas los valores de la superficie drenada proyectada en  $km^2$  o en porcentaje, obtenida hasta un determinado nivel, el cual se lleva al eje de las ordenadas, generalmente en metros. Normalmente se puede decir que los dos extremos de la curva tienen variaciones abruptas.

La función hipsométrica es una forma conveniente y objetiva de describir la relación entre

la propiedad altimétrica de la cuenca en un plano y su elevación.

- ***Polígono de frecuencia***

Es la representación de la superficie, en  $km^2$  o en porcentaje, comprendida entre dos niveles, siendo la marca de clase el promedio de las alturas. De esta forma, con diferentes niveles se puede formar el histograma. Este diagrama de barras puede ser obtenido de los mismos datos de la curva hipsométrica. Realmente contiene la misma información de ésta pero con una representación diferente, dándonos una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca

- ***Coefficiente de masividad (Cm)***

El coeficiente de masividad se define como el cociente entre la pendiente media de la cuenca y el área de la cuenca. Se expresa mediante la ecuación 25.

$$Cm = \frac{Sc}{A} \quad (25)$$

Dónde:

$Cm$  : Coeficiente de masividad.

$Sc$  : Pendiente media de la cuenca ( $m/km$ ).

$A$  : Área de la cuenca ( $km^2$ ).

• ***Parámetros de forma***

- ***Coefficiente de compacidad***

También conocido por el nombre de Coeficiente de Gravelius, este coeficiente relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca teórica circular de igual área; estima, por tanto, la relación entre el ancho promedio del área de captación y la longitud de la cuenca (longitud que abarca desde la salida hasta el punto topográficamente más alejado de ésta). Se expresa mediante la ecuación 26.

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (26)$$

Dónde:

$Cg$  : Coeficiente de compacidad.

$P$  : Perímetro de la cuenca ( $km$ ).

$A$  : Área de la cuenca ( $km^2$ ).

Toma siempre un valor mayor a la unidad, creciendo con la irregularidad de la cuenca.

#### - **Factor de forma**

El factor de forma se define como 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 entre la longitud del cauce principal. Se expresa mediante la ecuación 27.

$$FF = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (27)$$

Dónde:

$FF$  : Factor de forma.

$A$  : Área de la cuenca ( $km^2$ ).

$L$  : Longitud del cauce principal de la cuenca ( $km$ ).

#### - **Relación de elongación**

Se define como el cociente adimensional entre el diámetro de un círculo que tiene igual área que la cuenca y la longitud ( $Lc$ ) de la misma. La longitud ( $Lc$ ) se define como la más grande dimensión de la cuenca, a lo largo de una línea recta desde la salida hasta la divisoria, paralela al cauce principal. Se expresa mediante la ecuación 28.

$$Re = \frac{D}{Lc} = 1.1284 \frac{\sqrt{A}}{Lc} \quad (28)$$

Dónde:

$Re$  : Relación de elongación.

$A$  : Área de la cuenca ( $km^2$ ).

$Lc$  : Longitud máxima de la cuenca ( $km$ ).

Valores de  $R_c$  cercanos a la unidad se encuentran correlacionados con relieves fuertes y pendientes pronunciadas.

- **Relación de circularidad**

El índice de circularidad de Miller compara el área de la cuenca con el área de un círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca, es decir, de lo contrario al índice de compacidad. Se expresa mediante la ecuación 29.

$$R_c = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (29)$$

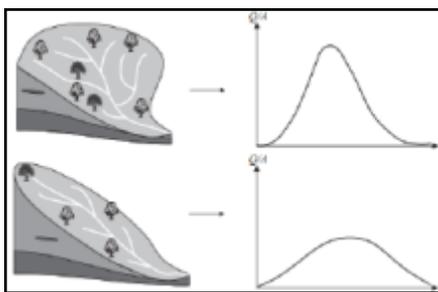
Dónde:

$R_c$  : Relación de circularidad.

$P$  : Perímetro de la cuenca ( $km$ ).

$A$  : Área de la cuenca ( $km^2$ ).

Los valores oscilan de 0 a 1, y el máximo valor equivalente a la unidad, lo que correspondería a una cuenca de forma circular.



**Figura 23: Impacto de la forma de la cuenca en el hidrograma**

FUENTE: Hydrology (Musy et al., 2011)

• **Parámetros de la red de drenaje**

- **Longitud del cauce principal**

Es la longitud horizontal principal del cauce principal de la cuenca, desde su nacimiento hasta su salida.

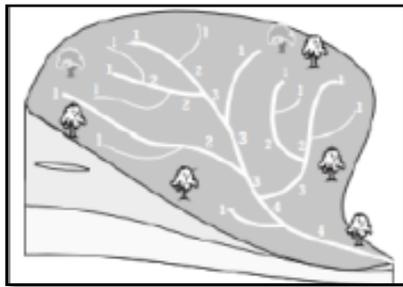
- ***Pendiente equivalente constante del cauce***

Representa la pendiente del cauce principal, la cual se puede estimar por diferentes métodos, uno de ellos es el de los valores extremos, el cual consiste en determinar el desnivel  $H$  entre los puntos más elevado y más bajo del río en estudio y luego dividirlo entre la longitud del mismo cauce. Se expresa mediante la ecuación 30.

$$S_C = \frac{(Cota_{nacimiento} - Cota_{salida})}{Longitud_{cauce}} \quad (30)$$

- ***Orden de la cuenca***

Es un número que refleja el grado de ramificación de cada uno de los ríos. El orden de la cuenca está dado por el orden del río principal como se presenta en la Figura 24.



**Figura 24: Orden de ríos según el criterio de Strahler**  
FUENTE: Hydrology (Musy et al., 2011)

- ***Frecuencia de corrientes***

Se define como el número de segmentos de corrientes por unidad de área. Se expresa mediante la ecuación 31.

$$F = \frac{Nu}{A} \quad (31)$$

Dónde:

$F$  : Frecuencia de corrientes.

$Nu$  : Número de segmentos de corrientes perennes o intermitentes.

$A$  : Área de la cuenca ( $km^2$ ).

- **Densidad de drenaje**

Está definida como la relación entre la longitud total a lo largo de todos los canales de agua de la cuenca en proyección horizontal y la superficie total de la cuenca. Se expresa mediante la ecuación 32.

$$Dd = \frac{\sum L_i}{A} \quad (32)$$

Dónde:

$Dd$  : Densidad de drenaje de la cuenca.

$L_i$  : Longitud total de las corrientes de orden  $i$  (km).

$A$  : Área de la cuenca ( $km^2$ ).

- **Extensión media del escurrimiento**

Se define como la distancia media que el agua debería escurrir sobre la cuenca para llegar al cauce y se estima por la relación que existe entre el área y cuatro veces la longitud de todos los cauces de la cuenca. Se expresa mediante la ecuación 33.

$$Lm = \frac{A}{4 \sum L_i} = \frac{1}{4Dd} \quad (33)$$

Dónde:

$Lm$  : Extensión media del escurrimiento.

$Dd$  : Densidad de drenaje de la cuenca.

- **Coficiente de torrencialidad**

Se define como el cociente entre la cantidad de precipitación total media areal ( $mm/año$ ) y el área de recepción de dicha precipitación ( $km^2$ ). Se expresa mediante la ecuación 34.

$$Ct = \frac{Pp}{A} \quad (34)$$

Dónde:

- $Ct$  : Coeficiente de torrencialidad.  
 $Pp$  : Precipitación total media areal de la cuenca ( $mm/año$ ).  
 $A$  : Área de la cuenca ( $km^2$ ).

#### - **Relación de bifurcación**

Después de optar por un modelo de ordenación de los canales de una cuenca, es posible definir la relación de bifurcación como el resultado de dividir el número de canales de un orden dado entre el número de canales del orden inmediatamente superior. Se expresa mediante la ecuación 35.

$$Rb = \frac{N_n}{N_{n+1}} \quad (35)$$

Dónde:

- $Rb$  : Relación de bifurcación.  
 $N_n, N_{n+1}$  : Número de canales de orden  $n$  y  $n+1$ .

#### **4.2.5. Análisis de la variabilidad de la precipitación diaria**

- **Curva de distribución acumulada**

La función de distribución acumulada de la precipitación diaria permite ver el porcentaje de las precipitaciones que quedan por encima o por debajo de ciertos valores establecidos respecto al total.

Siguiendo la metodología propuesta por Turkey, se determinaron los números de clase mediante la ecuación 36, y los anchos de clase mediante la ecuación 37; para cada una de las estaciones pluviométricas.

$$N^\circ \text{ clase} = 1.33 \cdot \ln(n) + 1 \quad (36)$$

$$\text{Ancho de clase} = \frac{(P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}})}{(N^\circ \text{ clase} - 1)} \quad (37)$$

A partir de tablas de frecuencias elaboradas para las estaciones pluviométricas: *Tambo, Colpar, Quilcas, Cruzpampa, Chacrampa, Sincos*; se elaboraron las respectivas curvas de distribución acumulada, periodo de estudio Diciembre 2013 –Marzo 2015.

- ***Coefficiente de correlación de Pearson***

Este coeficiente mide el grado de asociación de dos variable. Tiene la característica de ser adimensional y variar en un rango  $-1 \leq r_{xy} \leq 1$ , donde  $r_{xy} = -1$  denota una correlación negativa perfecta. Por otro lado si  $r_{xy} = 1$  existe una asociación lineal positiva de las variables. Si  $r_{xy} = 0$  significa que existe una independencia lineal entre las variables. Su expresión matemática se muestra en la ecuación 38.

$$r_{xy} = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (38)$$

Donde:

$r_{xy}$ : Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables x e y.

x: Variable x.

$\bar{x}$ : Media de la variable x.

y: Variable y.

$\bar{y}$ : Media de la variable y.

n: Tamaño de la muestra.

Asimismo, es necesario evaluar la significancia estadística dado un cierto coeficiente de correlación  $r_{xy}$  obtenido en una determinada muestra. Se trata de comprobar si dicho coeficiente es posible que se encuentre dentro de la distribución muestral especificada por la *Hipótesis nula*. A efectos prácticos, se calcula el número de desviaciones tipo que se encuentra el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la formula la ecuación 39.

$$t = \frac{r_{xy} - 0}{\sqrt{\frac{1 - r_{xy}^2}{n - 2}}} \quad (39)$$

Se compara el valor obtenido con el existente en las tablas para un cierto nivel de significación  $\alpha$  y N-2 grados de libertad  $t_{(\alpha, N-2)}$  que como se sabe, marca el límite (baja probabilidad de ocurrencia, según la Hipótesis nula) de pertenencia de un cierto coeficiente  $r_{xy}$  a la distribución muestra de correlaciones procedentes de una población con  $(\rho=0)$  .

El Coeficiente de Correlación de Pearson fue calculado para cada par de estaciones pluviométricas (*Tambo, Colpar, Quilcas, Cruzpampa, Chacrampa, Sincos*), en el periodo de estudio de Diciembre 2013-Marzo 2015.

#### **4.2.6. Sistema de modelación hidrológica-HEC-HMS**

El SMH Hec-Hms (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) es un modelo semi-distribuido desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos y dispone de una interfaz gráfica de usuario para el acceso de la información.

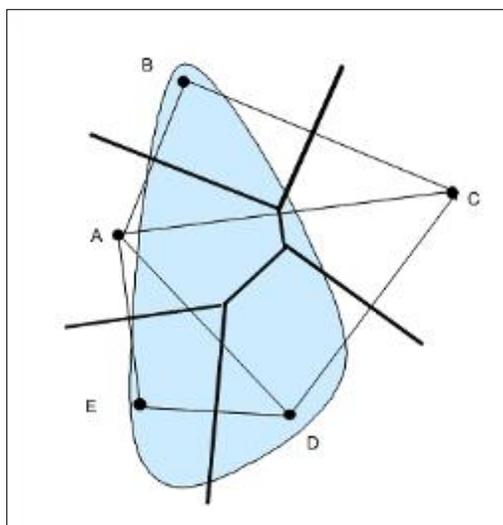
El modelo hidrológico precipitación-escorrentía para las cuencas Anya y Mchique fue elaborado teniendo como periodo de calibración: Diciembre 2013 – Julio 2014; y como periodo de validación: Agosto 2014 – Marzo 2015.

El sistema de modelación hidrológica Hec-HMS consideró: la simulación de las pérdidas, la transformación precipitación-escorrentía, el tránsito de caudales y el modelamiento del flujo base.

##### **4.2.6.1. Modelo de precipitación**

Mediante el método del polígono de Thiessen se calculó la precipitación media diaria para las cuencas Anya y Mchique. Dicho método distribuye la precipitación según el área de influencia de cada estación pluviométrica, considerando que al interior de cada una de estas áreas o polígonos la precipitación es constante. Se expresa mediante la ecuación 40, y se ilustra en la Figura 25.

$$\overline{Pp} = \frac{1}{A} \sum_i a_i \cdot Pp_i \quad (40)$$



**Figura 25: Polígonos de Thiessen**

FUENTE: Manual de referencia técnica Hec-HMS, 2000

Los polígonos de Thiessen fueron construidos a través de la determinación de las áreas de influencia para cada una de las estaciones pluviométricas: *Tambo*, *Colpar* y *Quilcas* (cuenca Anya); y las estaciones *Cruzpampa*, *Chacrampa* y *Sincos* (cuenca Mchique). A partir de ello, una matriz de pesos fue elaborada para cada cuenca en estudio. Las matrices de pesos son mostradas en la Tabla 09 y la Tabla 10.

**Tabla 9: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Anya**

Subcuenca	Estaciones		
	Quilcas	Colpar	Tambo
Subanya_1	0.46	0.39	0.15
Subanya_2	0.18	0.44	0.38
Subanya_3	1.00	0.00	0.00

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 10: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Mchique**

Subcuenca	Estaciones		
	Cruzpampa	Chacrampa	Sincos
Submchique_1	0.48	0.52	0.00
Submchique_2	0.81	0.19	0.00
Submchique_3	0.00	0.39	0.61

FUENTE: Elaboración propia



**a. *Interceptación en la cubierta vegetal (Canopy storage)***

Representa la parte de la precipitación que no alcanza el suelo porque es retenida en las plantas. La única entrada es la precipitación, y la única salida es la evapotranspiración. El modelo Hec-HMS coloca en este nivel las primeras precipitaciones, hasta que se alcance la capacidad máxima de almacenamiento.

Dicho valor fue estimado, para las cuencas Anya y Mchique, a partir de la inspección de campo realizada durante el periodo de estudio Diciembre 2013 – Marzo 2015 y en base al Mapa 02 de Cobertura y Uso de suelo el cual fue elaborado por el proyecto VLIR a partir de un MDE (Modelo Digital de Elevación) ASTER GDEM 2 de la NASA.

**b. *Almacenamiento en las depresiones superficiales (Surface storage)***

Representa el volumen de agua retenido en las irregularidades de la superficie del terreno. La entrada está dada por las precipitaciones que no fueron interceptadas por la vegetación; mientras que las salidas fueron inicialmente la infiltración y la *Eto*. Posteriormente, el volumen que superó el máximo almacenamiento en este nivel pasa a ser escurrimiento superficial.

El almacenamiento en las depresiones superficiales fue estimado para las cuencas Anya y Mchique, a partir de la inspección de campo realizada durante el periodo de estudio y del estudio de Balance Hidrológico superficial de las cuencas Anya y Mchique (Llauca, 2014).

**c. *Almacenamiento en el perfil del suelo (Soil profile storage)***

El perfil del suelo comprende dos sub-zonas de almacenamiento las cuales se describen en la tabla 11. Cabe mencionar que la capacidad de almacenamiento máximo en el perfil del suelo, en Hec HMS, es la diferencia entre el contenido de humedad del suelo en saturación (porosidad del suelo) y el contenido de humedad en el punto de marchitez (contenido de humedad debajo del cual cesa *Eto*).

La zona superior (upper zone) del suelo es la diferencia entre el contenido de humedad en saturación y el contenido de humedad a capacidad de campo. La zona de tensión (tensión

zone) es la diferencia entre el contenido de humedad a capacidad de campo y a punto de marchitez

**Tabla 11: Sub-zonas de almacenamiento del perfil del suelo, modelo SMA**

<b>Zona superior (upper zone)</b>	<b>Zona de tensión (tension zone)</b>
Es la parte del suelo que puede perder agua por <i>Eto</i> o por percolación.	Es la parte del agua contenida en el suelo que se pierde solamente por <i>Eto</i> .
Corresponde al agua gravífica, que ocupa los poros del suelo y es susceptible de ser atrapada por las raíces de las plantas o de ser arrastrada hacia abajo por la gravedad.	Corresponde al agua adherida a las partículas del suelo; las raíces pueden utilizarla, pero no puede moverla. La <i>Eto</i> primero toma agua de la Upper zone, y posteriormente de la Tension zone

**FUENTE: Manual técnico, HMS (2000).**

El almacenamiento en el perfil del suelo fue estimado en base a la información de textura de suelos de los distritos de Sincos, Quilcas y Saño; obtenida del estudio de “Primera aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelo agrícola en el valle del Mantaro” desarrollado por el Proyecto - Pronóstico Estacional de Lluvias y Temperaturas en la cuenca del río Mantaro para su Aplicación en la Agricultura (IGP, 2010).

**d. Almacenamiento en el acuífero (Groundwater storage)**

Consideró el almacenamiento en sólo uno de los dos acuíferos que propone el modelo de consideración continua de la humedad del suelo (el almacenamiento en el acuífero más profundo no fue considerado). Dicho almacenamiento subterráneo recibió directamente la percolación del agua gravífica que no fue atrapada por la *Eto* y que excedió la capacidad de almacenamiento del suelo. Desde el acuífero considerado, el agua pudo incorporarse a la escorrentía subterránea (alimentando el caudal base de los ríos) o tener una percolación profunda (en este caso, el modelo consideró esta agua como pérdida, ya que sale del sistema). Este se tomó del estudio de Balance Hidrológico superficial de las cuencas Anya y Mchique (Llauca, 2014).

A continuación se presenta los parámetros del modelo de pérdidas de Soil moisture accounting, en la tabla 12.

**Tabla 12: Parámetros del modelo de pérdidas SMA de Hec-HMS**

<b>Parámetro</b>	<b>Unid.</b>	<b>Descripción</b>
Intercepción en la cubierta vegetal	mm	Representa la parte de la precipitación retenida por la vegetación.
Intercepción en las depresiones superficiales	mm	Representa la parte de la precipitación almacenada en pequeñas depresiones del terreno.
Tasa de infiltración máxima	mm/hr	Representa la máxima velocidad con la cual el agua es absorbida en el suelo.
Almacenamiento total del suelo	mm	Representa la parte de la precipitación almacenada en el perfil del suelo.
Almacenamiento en la zona de tensión	mm	Representa la parte de la precipitación almacenada entre el punto de marchitez y la capacidad de campo del suelo.
Tasa de percolación máxima del suelo	mm/hr	Representa la máxima velocidad con la que se mueve el agua en el suelo, hacia el acuífero adyacente.
Almacenamiento subterráneo máxima	mm	Representa el máximo almacenamiento del acuífero adyacente.
Tasa de percolación subterránea máxima	mm/hr	Representa la percolación profunda desde el acuífero adyacente.
Coefficiente subterráneo	hr	Representa el tiempo en el que el agua es almacenada en el acuífero adyacente, antes de incorporarse como flujo base, o perderse por percolación profunda.

FUENTE: Us Army Corps of Engineers, 2000

➤ **Obtención de parámetros del modelo de pérdidas *Soil moisture accounting (SMA)***

La metodología para la obtención de los parámetros del modelo SMA, fue la siguiente:

- La intercepción en la cubierta vegetal fue obtenida a partir del mapa de cobertura y uso de suelos que se elaboró para las cuencas Anya y Mchique.
- La intercepción en las depresiones superficiales, se obtuvo a partir de las inspecciones y recorridos en ambas cuencas durante el periodo de estudio.
- La tasa de infiltración máxima se obtuvo a partir de pruebas de infiltración y de la

clase textural de los suelos, esta última según lo indicado por el estudio de Primera aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelos agrícolas en el valle del Mantaro” (IGP, 2010).

- El almacenamiento total y en la zona de tensión del suelo, se obtuvieron a partir de la porosidad según la clase textural del suelo y a una profundidad representativa.
- La tasa de percolación máxima, almacenamiento subterráneo máxima, tasa de percolación subterránea máxima y el coeficiente subterráneo, tomaron valores iniciales en base al estudio de balance hidrológico superficial de las cuencas Anya y Mchique (Llauca, 2014).

#### **4.2.6.4. Modelo de transformación precipitación - escorrentía**

##### **a. Hidrograma sintético de Clark**

Este método supone que la cuenca considerada funciona como un depósito. Un aumento del caudal de entrada de un depósito o embalse se refleja en el caudal de salida amortiguado y retardado.

El modo más simple de considerar este fenómeno es considerar un depósito lineal (lineal reservoir): eso significa que existe una relación lineal entre el volumen almacenado en el depósito y el caudal de salida; se expresa mediante la ecuación 41.

$$S = Q * R \quad (41)$$

Dónde:

- $S$  : Volumen almacenado.
- $Q$  : Caudal de salida de la cuenca.
- $R$  : Constante de proporcionalidad.

Por otra parte, es evidente que para un  $\Delta t$  dado:

$$V_{in} - V_{out} = \Delta S \quad (42)$$

Dónde:

$V_{in}$  : Volumen de ingreso en dicho  $\Delta t$ .

$V_{out}$  : Volumen de salida en dicho  $\Delta t$ .

$\Delta S$  : Variación del volumen almacenado en dicho  $\Delta t$ .

Dividendo la  $V_{in}-V_{out}=\Delta S$  entre  $\Delta t$  resulta:

$$I - Q = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (43)$$

Dónde:

$I$  : Caudal de entrada medio en dicho  $\Delta t$ .

$Q$  : Caudal de salida medio en dicho  $\Delta t$ .

Los caudales medios de entrada ( $I$ ) y de salida ( $Q$ ) a lo largo del intervalo  $\Delta t$  pueden ser considerarlos como la media de los caudales en los extremos del  $\Delta t$ . Y el  $\Delta S$  a lo largo del  $\Delta t$  es:  $S_i - S_{i-1}$ . Sustituyendo estos valores en la ecuación 44, resulta:

$$\frac{I_{i-1}+I_i}{2} - \frac{Q_{i-1}+Q_i}{2} = \frac{S_i+S_{i-1}}{2} \quad (44)$$

E introduciendo el valor  $S$  expresado en la ecuación 45, resulta:

$$\frac{I_{i-1}+I_i}{2} - \frac{Q_{i-1}+Q_i}{2} = R \cdot \frac{Q_i+Q_{i-1}}{2} \quad (45)$$

Finalmente, despejando la ecuación 46, resulta:

$$Q_i = \frac{I_{i-1}+I_i}{2} \cdot c - Q_{i-1} \cdot (1 - c) \quad (46)$$

Siendo:

$$c = \frac{2 \cdot \Delta t}{2R + \Delta t} \quad (47)$$

Dónde:

$I_{i-1}, I_i$  : Caudal de entrada en los tiempos  $t_{i-1}$  y  $t_i$  respectivamente.

$Q_{i-1}, Q_i$ : Caudal de salida en los tiempos  $t_{i-1}$  y  $t_i$  respectivamente.

$\Delta t$  : Incremento de tiempo entre los tiempos  $t_{i-1}$  y  $t_i$ .

$R$  : Coeficiente de almacenamiento de la cuenca.

- ***Tiempo de concentración***

Es el tiempo transcurrido entre el final del hietograma de excesos y el final del escurrimiento directo. Además se puede definir como el tiempo que demora en viajar una partícula de agua desde el punto más remoto hasta el punto de interés. Corresponde al periodo entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial. Existen diferentes métodos para su cálculo, no obstante en el estudio se utilizó el planteado por Bransby Williams mediante la ecuación 48.

$$T_c = 0.243 \frac{L}{A^{0.1} S^{0.2}} \quad (48)$$

Dónde:

$L$  : Longitud del cauce principal de la cuenca ( $km$ ).

$A$  : Área de la cuenca ( $km^2$ ).

$S$  : Pendiente del cauce principal de la cuenca.

- ***Coeficiente de almacenamiento***

El coeficiente de almacenamiento de una cuenca es un índice que representa el almacenaje temporal del exceso de precipitación en la cuenca. Este coeficiente puede ser calculado como el flujo en el punto de inflexión en la extremidad de bajada del hidrograma dividida por la derivada respecto al tiempo de flujo, por lo que tiene la unidad de tiempo en h.

Debido a que dichas cuencas no contaban con información hidrométrica previa a la realización de esta investigación para el cálculo exacto de este parámetro, este fue aproximado y calculado a partir de las visitas de campo realizadas a ambas cuencas, no habiendo una importancia topográfica para el coeficiente de almacenamiento.

#### 4.2.6.5. Modelo de tránsito de caudales simulados

##### a. Onda cinemática

Este método permite aproximar los canales naturales a formas básicas de secciones transversales conocidas como triángulos, trapecios y rectángulos; tomando en cuenta factores como: pendiente, longitud, dimensión transversal, forma y coeficiente de Manning. Las formas básicas de las ecuaciones son similares a las ecuaciones de flujo superficial (ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento) y se resumen en las ecuaciones 49 y 50.

$$q = \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (49)$$

$$Q = \alpha_c + A^{m_c} \quad (50)$$

Donde:

Q : Caudal del canal (m<sup>3</sup>/s).

A : Área transversal del canal (m<sup>2</sup>).

q : Caudal lateral, por unidad del canal (m<sup>3</sup>/s/m).

$\alpha_c, m_c$ : Coeficientes cinemáticos del canal, función de la forma de la sección transversal y de la rugosidad del canal.

La Tabla 13 presenta los parámetros típicos de las secciones más significativas para la representación y aproximación de cauces naturales.

**Tabla 13: Parámetros de secciones típicas**

Forma	$\alpha_c$	$m_c$
Triangular	$\frac{0.94\sqrt{S}}{n} \left( \frac{z}{1+z^2} \right)^{1/3}$	4/3
Rectangular	$\frac{1.49\sqrt{S}}{n} (W^{-2/3})$	5/3

Trapezoidal	$\frac{1.49\sqrt{S}}{n} \cdot A^{5/3} \cdot \left( \frac{1}{W + 2y\sqrt{1 + z^2}} \right)^{2/3}$	4/3 – 5/3
-------------	--	-----------

FUENTE: Hydrology and Floodplain Analysis (Bedient et al., 2008)

Donde W es la base de la sección en m, Z es el talud de la sección, n es el coeficiente de Manning, A es el área de la sección en m<sup>2</sup> y S es la pendiente en m/m .

Los ríos Anya y Mchique se aproximaron a secciones rectangulares para la construcción del submodelo del tránsito de los caudales simulados, habiéndose hecho mediciones de campo para la geometría de estos.

#### **4.2.6.6. Modelo del flujo base**

##### **a. Constante mensual**

Con la información de caudales observados en épocas de estiaje, el flujo base puede determinarse como una constante para cada mes de simulación, pudiendo variar de mes a mes.

Teniendo en cuenta las visitas a campo así como el registro de caudales medios diarios para el periodo de Diciembre 2013- Marzo 2015, se consideró un flujo base constante para las subcuencas ubicadas en la parte baja de la cuenca Anya y Mchique.

#### **4.2.6.7. Simulación de la Humedad del suelo con Hec Hms**

Si bien el modelo Hec Hms es más conocido por la simulación de eventos, esto no quiere decir que no cuente con modelos para la simulación continua; tal es el caso del modelo de la consideración continua de la humedad (SMA), entre los diferentes resultados que nos brinda este método destacaremos para nuestros fines el de la simulación de la humedad expresado en fracción de saturación del suelo que es definida como el porcentaje de la capa del suelo que está saturado. La fracción de saturación es expresada mediante la ecuación 51.

$$S_w = \frac{\theta}{\emptyset} \quad (51)$$

Donde:

$S_w$ : Fracción de saturación del suelo.

$\theta$ : Humedad del suelo.

$\emptyset$ : Porosidad del suelo.

Teniendo la textura del suelo de cada cuenca se puede obtener ciertos parámetros como la porosidad del suelo, la conductividad hidráulica en suelo saturado, etc. En la tabla 14 se muestra.

**Tabla 14: Estimaciones de clases texturales**

<b>Clase textural</b>	<b>Porosidad <math>\emptyset</math> (cm<sup>3</sup>/cm)</b>	<b>Conductividad Hidráulica en suelo saturado (cm/hr)</b>
Arena	0.437	21
Arena arcillosa	0.437	6.11
Franco arenoso	0.453	2.59
Franco	0.463	1.32
Franco limoso	0.501	0.68
Franco arcilloso arenoso	0.398	0.43
Franco arcilloso	0.464	0.23
Franco arcilloso limoso	0.471	0.15
Arcilla arenosa	0.43	0.12
Arcilla limosa	0.479	0.09
Arcilla	0.475	0.06

Fuente: Texture class estimates (Rawls, et al., 1982)

En base a la porosidad según la clase textural es que se puede llevar la fracción de saturación simulada a humedad del suelo simulada, y es esta finalmente la que se compara con la humedad del suelo observada (humedad obtenida de campo) y hallar una relación para el periodo de Diciembre 2013-Marzo 2015.

#### 4.2.7. Sistema de modelación hidrológica-R.S. Minerve

EL SMH RS Minerve sirve para la simulación de la formación de la superficie libre de la escorrentía de flujo y de propagación. Cuenta con un esquema semi-distribuido con la cual modela complejas redes hidrológicas. Además de determinados procesos hidrológicos como la fusión de la nieve, deshielo de los glaciares, la superficie, el flujo subterráneo y la humedad del suelo.

##### 4.2.7.1. Estación Meteorológica Virtual

El software trabaja con una “estación virtual”, la cual se ubicará en el centroide (cx, cy, cz) de cada cuenca o subcuenca según el caso, esta permite la distribución espacial de las variables meteorológicas (precipitaciones, temperatura, ETP) disponibles o estimadas de una base de datos, con referencia espacial en el sistema métrico de coordenadas.

Los métodos elegidos para la distribución espacial de la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial corresponden a los métodos de Thiessen y Shepard. El primer método, Thiessen, busca a la estación meteorológica más cercana para cada variable meteorológica. El segundo, Shepard, busca todas las estaciones disponibles que están en un radio de búsqueda y calcula la variable meteorológica en función de la ponderación de distancia inversa.

Para fines de la investigación se utilizó la interpolación Shepard, puesto que esta nos permitió utilizar todas las estaciones instaladas en ambas cuencas y abarcar así una mayor variedad de información meteorológica.

- **Método de Shepard**

La evaluación de una variable en una estación virtual “s” desde “n” estaciones meteorológicas localizadas en  $i = 1, 2, \dots, n$  se obtiene ponderando según la inversa del cuadrado de la distancia  $d_{i,s}$  entre la estación meteorológica  $i$  de la base de datos y la estación virtuales  $s$ . Tal como se muestra en la ecuación 52.

$$d_{i,s} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (52)$$

Donde:

$x_i, y_i$  : Posición de la estación meteorológica “i” de la base de datos.

$x_s, y_s$  : Posición de la estación virtual “s”.

$s$  : Distancia entre la estación meteorológica “i” y la estación virtual “s”.

Las estaciones meteorológicas “n” para la interpolación espacial en la estación “s” virtuales se determinan automáticamente respetando a la ecuación 53. Por lo tanto, el número “n” de estaciones meteorológicas es variable para cada par (s, rs). Sin embargo, se puede fijar un número mínimo de estaciones a utilizadas para la interpolación.

$$d_{i,s} \leq r_s \quad (53)$$

Donde:

$r_s$  : radio de búsqueda de estaciones meteorológicas.

El método de interpolación Shepard (1968) también se ha ampliado para tener en cuenta la evolución de las variables meteorológicas en función de la altitud. Por lo tanto, las variables  $P_i$ ,  $T_i$  y ETP, localizada en la altitud  $z_i$  son reemplazados por sus equivalentes relacionados con la altitud de la estación virtual “s”, de acuerdo con una relación lineal con una elevación constante gradiente  $dX_s/dz$ , correspondiente a los gradientes de precipitación (gradiente P,  $dP_s/dz$ ), temperatura (gradiente T,  $dT_s/dz$ ) o la evapotranspiración potencial (Gradiente ETP,  $dETP_s/dz$ ). Además, un coeficiente para la precipitación, la evapotranspiración o la temperatura potencial también se incluye en el método para obtener el valor final en la estación “s” virtual, tal como se presentan en las ecuaciones 54, 55 y 56.

$$P_s = CoeffP_s \cdot \frac{\sum_{i=1}^n P_i + \frac{dP_s}{dz} \cdot (Z_s - Z_i) \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (54)$$

$$T_s = CoeffT_s \cdot \frac{\sum_{i=1}^n T_i + \frac{dT_s}{dz} \cdot (Z_s - Z_i) \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (55)$$

$$ETPs = CoeffPs \cdot \frac{\sum_{i=1}^n ETP_i + \frac{dETPs}{dz} \cdot (Z_s - Z_i) \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (56)$$

Donde:

- Ps : Valor de la precipitación en la estación virtual de “s”
- Ts : Valor de la temperatura en la estación virtual de “s”
- ETPs : Valor de la evapotranspiración potencial en la estación virtual de “s”
- Pi : Valor de la precipitación en la estación meteorológica “i”
- Ti : Valor de la temperatura en la estación meteorológica “i”
- ETPi : Valor de la evapotranspiración potencial en la estación meteorológica “i”
- CoeffPs : Coeficiente de precipitación
- CoeffTs : Coeficiente de temperatura (°C)
- CoeffETPs : Coeficiente de evapotranspiración potencial
- Zs : Altitud de la estación virtual de “s” (m.s.n.m)
- Zi : Posición de la estación meteorológica “i” de la base de datos (m.s.n.m)

A continuación se muestra una matriz de pesos ponderados para las estaciones virtuales según el método de interpolación de Shepard para las subcuencas de la cuenca Anya (Tambo, Colpar y Quilcas), así como también para las de la cuenca Mchique (Sincos, Chacrampa y Cruzpampa), esta matriz de pesos se considera para la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial.

**Tabla 15: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Anya**

Subcuenca-Estación virtual	Estación		
	Quilcas	Colpar	Tambo
Subanya-Est. virtual 1	0.289	0.388	0.323
Subanya-Est. virtual 2	0.546	0.303	0.151
Subanya-Est. virtual 3	0.546	0.303	0.151

Fuente: Elaboración propia

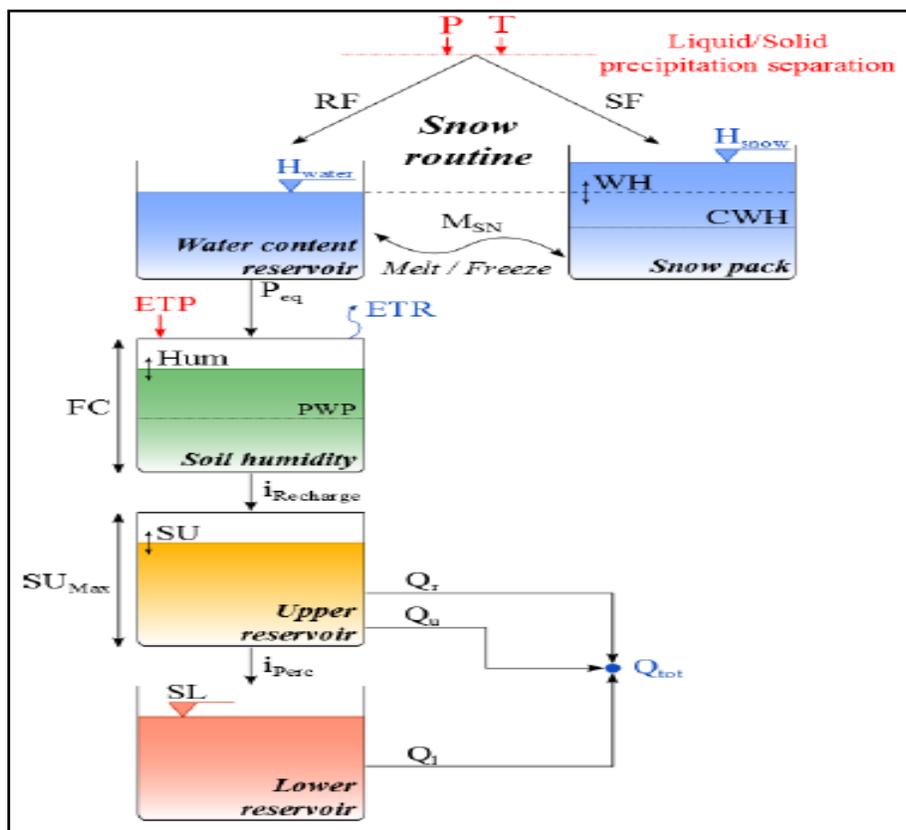
**Tabla 16: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Mchique**

Subcuenca-Estación virtual	Estación		
	Sincos	Chacrampa	Cruzpampa
Submchique-Est. virtual 1	0.184	0.415	0.401
Submchique-Est. virtual 2	0.071	0.169	0.760
Submchique-Est. virtual 3	0.547	0.387	0.066

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.7.2. Modelo HBV

El modelo lluvia-escorrentía integrado HBV (Bergström, 1976, 1992) se compone de una función de nieve, un depósito de humedad y dos depósitos de almacenamiento suelo (superior e inferior). La estructura del modelo se presenta en la Figura 27.



**Figura 27: Estructura del modelo Hbv**

Fuente: Manual técnico de Rs. Minerve v. 1.3.1.4

En la tabla 17 se muestra los parámetros, condiciones iniciales y el rango de valores que considera el software para la simulación del modelo.

**Tabla 17: Lista de parámetros y condiciones iniciales para el modelo HBV**

OBJETO	NOMBRE	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	RANGO DE VALORES	
<b>HBV</b>	A	m <sup>2</sup>	Superficie de la cuenca	>0	
	CFMax	mm/°C/día	Factor de fusión	0.5-20	
	CFR	-	Factor de recongelación	0.05	
	CWH	-	Contenido relativo de agua crítico en la capa de nieve	0.1	
	TT	°C	Temperatura umbral de lluvia/nieve	0-3	
	TTInt	°C	Intervalo de temperatura para la lluvia/nieve mezclado	0-3	
	TTSM	°C	Temperatura umbral para la nieve de fusión	0	
	Beta	-	Parámetro del modelo (coeficiente de forma)	1-5	
	FC	m	Capacidad máxima de almacenamiento del suelo	0.05-0.65	
	PWP	m	Punto de marchitez permanente del suelo	0.03-0.65	
	SUMax	m	Umbral del nivel de agua del reservorio superior	0- 0.1	
	Kr	1/d	Coficiente de almacenamiento del flujo cerca de la superficie	0.05-0.5	
	Ku	1/d	Coficiente de almacenamiento del interflujo	0.01-0.4	
	Kl	1/d	Coficiente de almacenamiento del flujo base	0- 0.15	
	Kperc	1/d	Coficiente de almacenamiento de la percolación	0-0.8	
	<b>Parámetros iniciales</b>				
	Hsnowlni	m	Altura inicial de nieve		-
	Whlni	-	Contenido relativo inicial en la capa de nieve		-
	Hlni	m	Humedad inicial		-
	SUlni	m	Nivel de agua inicial en el reservorio superior		-
SLlni	m	Nivel de agua inicial en el reservorio inferior		-	

Fuente: Manual técnico de Rs. Minerve v. 1.3.1.4

- **Procedimiento y secuencia de trabajo del SMH R.S Minerve**

La precipitación se divide primero en nevadas (SF) y lluvias (RF) como una función de la temperatura (ecuaciones 57 a 59). Si la temperatura observada es menor que el  $TT - TTInt / 2$ , sólo se producirán nevadas sólidas. Si la temperatura es superior a  $TT + TTInt/2$ , solamente se producirá lluvia. Si la temperatura observada se encuentra

entre estos valores, se producirán tanto de lluvias y nevadas.

$$RF = \alpha \cdot P \quad (57)$$

$$SF = (1 - \alpha) \cdot P \quad (58)$$

$$\begin{aligned} \alpha = 0 & \quad \text{Si } T < TT - TTInt/2 \\ \alpha = \frac{T - (TT - TTInt/2)}{TTInt} & \quad \text{Si } TT - \frac{TTInt}{2} < T < TT + TTInt/2 \\ \alpha = 1 & \quad \text{Si } T > TT + TTInt/2 \end{aligned} \quad (59)$$

Donde:

RF : Lluvia

$\alpha$  : factor de separación

P : Precipitación

SF : nevadas

T : temperatura (°C)

TT : Umbral de temperatura para la lluvia y nieve

TTInt : Intervalo de temperatura para la lluvia y nieve de mezcla (°C).

La nevada (SF) se utiliza como entrada para la capa de nieve, variando su contenido en función de la masa fundida o congelada. El cálculo de deshielo se realiza como sigue:

$$\begin{aligned} M_{sn} &= CFMax. (T - TTSM) \quad \text{if } T > TTSM \\ M_{sn} &= CFR. CFMax. (T - TTSM) \quad \text{if } T \leq TTSM \end{aligned} \quad (60)$$

$$dH_{snow}/dt = SF - M_{sn}$$

$$M_{sn} \leq SF + H_{snow}/dt \quad (61)$$

$$M_{sn} \geq -H_{water}/dt$$

Donde:

Msn	: deshielo o congelación
CFMax	: Factor de grado - día fusión (°C)
CFR	: Factor de recongelación
TTSM	: Temperatura crítica de deshielo (°C)
Hsnow	: Altura de la nieve
Hwater	: Contenido de agua
dt	: Tiempo de paso

La precipitación equivalente (Peq) se produce por el contenido de agua de la nieve (ecuaciones 62, 63 y 64).

$$WH = H_{water} / H_{snow} \quad (62)$$

$$\begin{aligned} P_{eq} &= RF + H_{water}/dt && \text{Si: } H_{snow} = 0 \\ P_{eq} &= 0 && \text{Si: } H_{snow} > 0 \text{ et } WH \leq CWH \\ P_{eq} &= (WH - CWH) \cdot H_{snow}/dt && \text{Si: } H_{snow} > 0 \text{ et } WH > CWH \end{aligned} \quad (63)$$

$$dH_{water}/dt = RF + M_{sn} - P_{eq} \quad (64)$$

Donde:

WH	: Contenido relativo de agua en la capa de nieve
CWH	: Contenido relativo crítico de agua en la capa de nieve
Peq	: Precipitación equivalente

El cálculo de la recarga se lleva a cabo en función de un parámetro de modelo Beta, como se presenta en la ecuación 65. La Evapotranspiración (ETR) se calcula como se muestra en la ecuación 66. Por último, la humedad del suelo (Hum) es calculada teniendo en cuenta como entrada la precipitación equivalente (Peq) y como salida la intensidad de recarga y ETR que se presenta en la ecuación 67.

$$i_{Recarga} = \left( \frac{Hum}{FC} \right)^{Beta} \cdot P_{eq} \quad (65)$$

$$ETR = ETP \cdot \frac{Hum}{PWP} \quad \text{Si: } Hum < PWP \quad (66)$$

$$ETR = ETP \quad \text{Si: } Hum \geq PWP$$

$$dHum/ dt = (P_{eq} - i_{Recarga}) - ETR \quad (67)$$

$$Hum \geq 0$$

Donde:

- $i_{Recarga}$  : Intensidad de recarga del reservorio
- Hum : Humedad del suelo
- FC : Capacidad máxima de almacenamiento del suelo
- Beta : Parámetro del modelo (coeficiente de forma)
- Peq : Precipitación equivalente
- ETR : Evapotranspiración
- ETP : Evapotranspiración potencial
- PWP : Punto de marchitez permanente del Suelo.

Luego, el flujo cerca de la superficie (escorrentía) se calcula en función del nivel de agua en el reservorio superior (SU) y su umbral, así como en el coeficiente de almacenamiento del flujo Kr.

$$Q_r = K_r \cdot (SU - SU_{Max}) \cdot A \quad \text{Si: } SU > SU_{Max} \quad (68)$$

$$Q_r = 0 \quad \text{Si: } SU \leq SU_{Max}$$

Donde:

- Qr : Flujo cerca de la superficie (flujo de escorrentía)
- Kr : Coeficiente de almacenamiento del flujo cerca de la superficie
- SU : Nivel de agua del reservorio superior
- Sumax : Umbral de nivel de agua de reservorio superior
- A : Área de la cuenca

El depósito superior (o depósito de interflujo), corresponde al almacenamiento superior del suelo que produce el interflujo, se calcula como sigue:

$$dSU/dt = K_{Recarga} - (K_{perc} - K_u).SU - Q_r/A \quad (69)$$

$$SU \geq 0$$

$$i_{perc} = K_{perc}.SU \quad (70)$$

$$Q_u = K_u.SU.A \quad (71)$$

Donde:

$K_{perc}$  : Coeficiente de almacenamiento de percolación

$K_u$  : Coeficiente de almacenamiento del interflujo

$i_{erc}$  : Intensidad de percolación

$Q_u$  : Interflujo

Posteriormente, el reservorio inferior (o flujo base del reservorio), corresponde al almacenamiento inferior del suelo, este se calcula como se presenta a continuación en las ecuaciones 72 y 73.

$$\frac{dSL}{dt} = i_{perc} - K_l.SL \quad (72)$$

$$SL \geq 0$$

$$Q_l = K_l.SL.A \quad (73)$$

Donde:

$SL$  : Nivel de agua del reservorio inferior

$K_l$  : Coeficiente de almacenamiento del flujo base

$Q_l$  : Flujo base

Finalmente, el flujo de salida total es:

$$Q_{tot} = Q_r + Q_u + Q_l \quad (74)$$

Donde:

$Q_{tot}$  : Flujo total

Las condiciones iniciales asociados a este modelo son  $H_{smow_{ini}}$ ,  $WH_{ini}$ ,  $SU_{ini}$  y  $SL_{ini}$ .

Los parámetros para calibrar son CFMax, CFR, CWH, TT, TTInt, TTSM, Beta, FC, PWP, Sumax, Kr, Ku, Kl y Kperc; y estos se consideraron de acuerdo al rango de valores anteriormente presentados en la tabla 17.

Las variables de entrada para este modelo son la precipitación (P), la temperatura (T) y la evapotranspiración potencial (ETP). La salida es la descarga total (Qtot).

#### ➤ **Obtención de los parámetros del modelo HBV**

Cabe mencionar que la capacidad máxima de almacenamiento del suelo y el punto de marchitez permanente del suelo fueron obtenidos de acuerdo a la porosidad del suelo según su clase textural, al no presentarse nieve los parámetros de altura inicial de nieve y el contenido relativo inicial en la capa de nieve tomaron valores de cero, la humedad inicial tomo el valor obtenida en campo con el método del TDR, los demás parámetros como los coeficientes de almacenamiento del flujo cerca de la superficie, del interflujo, del flujo base y el de percolación fueron obtenidos en primera instancia del rango de valores brindados por el modelo y posteriormente con la calibración se afinaron.

Los valores de la simulación de la humedad del suelo mediante el modelo HBV del R.S Minerve, están expresados en metros, por lo cual según lo leído en el manual de este, se hizo una comparación del 100 % de humedad igual a 1 m (recomendación del Dr. García Hernández coautor del manual técnico del R.S Minerve), con lo cual se pudo comparar finalmente los valores simulados y observados de la humedad del suelo.

#### **4.2.8. Calibración y validación de los modelos**

La calibración se realizó de manera manual, es decir, mediante ensayos de prueba y error, hasta encontrar los valores estadísticos de bondad de ajuste más óptimos los cuales reducen la incertidumbre entre los valores obtenidos con la simulación y los valores observados. Este procedimiento se realizó para la humedad del suelo y para los caudales.

Para la etapa de calibración se usó los datos de Diciembre 2013-Junio 2014, y para la validación datos de Agosto 2014-Marzo 2015.

Los parámetros estadísticos utilizados para determinar el grado de confiabilidad de la calibración y validación de la simulación fueron:

**a. Eficiencia de Nash Sutcliffe**

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología ya que evalúa la eficacia predictiva de los modelos hidrológicos. Se expresa mediante la ecuación 51 y 52.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (51)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{sim,i} - H_i)^2}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2} \quad (52)$$

Donde:

$Q_{sim,i}, H_{sim,i}$  : Caudal y Humedad del suelo simulada para el día  $i$  ( $m^3/s$ , %).

$Q_i, H_i$  : Caudal y humedad del suelo observada para el día  $i$  ( $m^3/s$ , %).

$\bar{Q}, \bar{H}$  : Media del caudal y humedad del suelo ( $m^3/s$ , %).

El coeficiente de Nash Sutcliffe mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. En la tabla 18 se presenta valores referenciales de este coeficiente.

**Tabla 18: Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe**

<b>E</b>	<b>AJUSTE</b>
< 0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Fuente: Molnar, 2011

**b. Coeficiente de correlación de Pearson (r)**

Expresa la dependencia lineal entre dos variables que, en nuestro caso, son los caudales y datos de humedad de suelo observados y simulados. Se expresa mediante la ecuación 60 y 61.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})^2} \quad (60)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H}_i)(H_{sim,i} - \bar{H}_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (H_{sim,i} - \bar{H}_{sim,i})^2} \quad (61)$$

Donde:

- $Q_{sim,i}, H_{sim,i}$  : Caudal y Humedad del suelo simulada para el día i (m<sup>3</sup>/s, %).  
 $Q_i, H_i$  : Caudal y humedad del suelo observada para el día i (m<sup>3</sup>/s, %).  
 $\bar{Q}_i, \bar{H}_i$  : Media del caudal y humedad del suelo (m<sup>3</sup>/s, %).  
 $\bar{Q}_{sim,i}, \bar{H}_{sim,i}$  : Media de los caudales y datos de humedad del suelo simulados.

El coeficiente de correlación puede tomar valores entre 0<r<1: a mayor valor de r, mejor ajuste. El uso de esta medida de bondad de ajuste se recomienda cuando se espera una relación lineal entre las variables observadas y simuladas.

**c. Error medio (MBE)**

Es una medida de error simple que representa el promedio de los errores de cada valor simulado y observado, pudiendo ser negativo o positivo. Su valor está dado por la ecuación 62 y 63.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)}{n} \quad (62)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{sim,i} - H_i)}{n} \quad (63)$$

Donde:

- $Q_{sim,i}, H_{sim,i}$  : Caudal y Humedad del suelo simulada para el día i (m<sup>3</sup>/s, %).  
 $Q_i, H_i$  : Caudal y humedad del suelo observada para el día i (m<sup>3</sup>/s, %).  
n : Número de días de evaluación.

**d. Raíz del error cuadrático medio (RMSE)**

La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Se expresa mediante la ecuación 64 y 65.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,t} - Q_i)^2}{n}} \quad (64)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{sim,t} - H_i)^2}{n}} \quad (65)$$

Donde:

$Q_{sim,i}, H_{sim,i}$  : Caudal y Humedad del suelo simulada para el día i (m<sup>3</sup>/s, %).

$Q_i, H_i$  : Caudal y humedad del suelo observada para el día i (m<sup>3</sup>/s, %).

n : Número de días de evaluación.

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

**e. Error Relativo al Volumen (%V)**

Representa el error en volumen de la simulación expresado en porcentaje, pudiendo variar positiva o negativamente, dependiendo si existe un exceso o un defecto (en volumen) respecto a la simulación. Se expresa mediante las ecuaciones 66 y 67.

$$\%V = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (66)$$

$$\%V = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (H_{sim,i} - H_i)}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (67)$$

Dónde:

$Q_{sim,i}, H_{sim,i}$  : Caudal y Humedad del suelo simulada para el día i (m<sup>3</sup>/s, %).

$Q_i, H_i$  : Caudal y humedad del suelo observada para el día i (m<sup>3</sup>/s, %).

n : Número de días de evaluación.

En el proceso de calibración, se debe buscar alcanzar el valor más bajo de %V, el valor ideal es %V=0.

**f. Error de los valores picos normalizados (NPE)**

El error de los valores picos normalizados indican el error relativo entre los caudales picos simulados y observados, tal como se presenta en la ecuación 68.

$$NPE = \frac{S_{max} - R_{max}}{R_{max}} \quad (68)$$

Donde:

$S_{max}$  : Caudal máximo simulado para el periodo de estudio (m<sup>3</sup>/s).

$R_{max}$  : Caudal máximo observado para el periodo de estudio (m<sup>3</sup>/s).

Teniendo en cuenta la simulación de caudales a nivel diario, los modelos Hec Hms y R.S Minerve de las cuencas Anya y Mchique se consideraron adecuados si durante el proceso de calibración y validación se obtuvo un valor mínimo de Nash-Shutcliffe de 0.5 y un coeficiente de correlación de Pearson de 0.7, con respecto a la humedad del suelo los valores de Nash y Pearson para cada modelo son distintos teniendo mejores resultados con el modelo del R.S Minerve.

**4.2.9. Análisis de sensibilidad**

La realización del análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo es provechoso para al desarrollo de este pues amplía el conocimiento sobre el grado de influencia de los parámetros que comprenden el modelo hidrológico. Este análisis se realizó tanto para los 9 parámetros del modelo Hec-Hms como para los 14 parámetros del R.S Minerve.

Los parámetros antes mencionados se consideraron como una línea base. Luego el modelo se corrió repetitivamente con los valores de la línea base, para un parámetro se multiplicado por 0.8 y 1.2, mientras los demás permanecían constantes. Este procedimiento se hizo tanto para comparar la humedad del suelo y los caudales simulados con los observados.

La performance del modelo se evaluó de acuerdo al coeficiente de Nash Stutcliffe y al coeficiente de correlación de Pearson. Cabe mencionar que los 5 parámetros en condiciones iniciales del modelo R.S Minerve, no se variaron para el análisis de sensibilidad de los caudales ni para la humedad del suelo.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados y discusiones de la presente investigación siguieron la siguiente secuencia: Descripción de la relación de las características geomorfológicas y de las coberturas y uso de suelo en el escurrimiento de las cuencas Anya y Mchique, descripción del comportamiento de la humedad del suelo, precipitación y caudales medios diarios, la simulación del comportamiento hidrológico de las cuencas y la comparación entre los modelos Hec Hms y R.S Minerve.

### 5.1. DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS Y DE LAS COBERTURAS Y USO DE SUELO DE LAS CUENCAS ANYA Y MCHIQUE

- El área de las cuencas Anya y Mchique es de 47.26 y 28.29 Km<sup>2</sup>, respectivamente, mientras que el perímetro es de 43.27 y 54.57 Km.
- La altitud media ponderada de la cuenca del río Mchique es de 3827 m.s.n.m. mientras que la del Anya es de 3589 m.s.n.m.
- La pendiente de la cuenca del río Mchique es de 21.54 por ciento mientras que la del Anya es de 28.65 por ciento.
- La pendiente del río Mchique es de 2.12 por ciento mientras que la del Anya es de 1.07 por ciento respectivamente.
- El coeficiente de compacidad de la cuenca del río Mchique es de 2.89 mientras que la del Anya es de 1.77. El primero es mayor, lo cual representa la irregularidad de la forma de dicha cuenca y lo alargada que es, en cambio la cuenca del Anya es más regular (ovalada).
- La relación de elongación de la cuenca del río Mchique es de 1.05 mientras que la del Anya es de 0.80. Al poseer la cuenca del Anya un valor menor que la del Mchique, se

puede deducir que presenta un relieve pronunciado, lo cual guarda relación con la pendiente media de la cuenca. Por otro lado, el valor de 1.05 de la cuenca Mchique nos indica que resulta ser una cuenca más plana respecto a su área.

- El factor de forma de la cuenca del río Mchique es de 0.14 mientras que la del Anya es de 0.22.
- El coeficiente de masividad de la cuenca del río Mchique es de 0.76 m/Km<sup>2</sup> mientras que la del Anya es de 0.61 m/Km<sup>2</sup>. El valor de 0.61 de la cuenca del Anya muestra que posee una estructura fisiográfica más montañosa que la del Mchique. Asimismo este parámetro se relaciona con la pendiente media de la cuenca.
- La frecuencia de corriente de la cuenca del río Mchique es de 1.52 mientras que la del Anya es de 5.03. Este parámetro nos indica que la cuenca del Anya tiene un mejor drenaje que la del Mchique pues posee un valor más alto.
- El coeficiente de torrencialidad de la cuenca del río Mchique es de 36.1 mientras que la del Anya es de 20.62. Se puede concluir que la cuenca del río Mchique tiene una mayor capacidad de evacuar el escurrimiento superficial ya que posee un valor más elevado. Al igual que la frecuencia de corriente, este parámetro depende de la cantidad de corrientes de primer orden que posean.
- La relación de circularidad de la cuenca del río Mchique es de 0.12 mientras que la del Anya es de 0.32. Al poseer la cuenca del Anya una relación de circularidad de 0.32 nos indica que se aproxima a una forma circular y ovalada.
- La relación de bifurcación de la cuenca del río Mchique es de 2.45 mientras que la del Anya es de 1.97.
- La densidad de drenaje de la cuenca del río Mchique es de 1.63 km/km<sup>2</sup> mientras que la del Anya es de 2.2 km/km<sup>2</sup>. Debido a que la cuenca del río Anya tiene una mayor densidad de drenaje, se puede decir que tiene una mayor estructura de la red fluvial y por ende un mayor potencial de erosión.
- En las Figuras 28-33 del Anexo 1 se muestran los polígonos de frecuencias, los rectángulos equivalentes y las curvas hipsométricas para la cuenca del Anya y Mchique respectivamente. Con respecto al rectángulo equivalente, se puede observar la clara forma alargada que posee la cuenca del Mchique, mientras que para la cuenca del Anya no es tan notoria esta tendencia. Por otro lado, la concavidad de la curva

hipsométrica del Anya demuestra la presencia de valles en la parte baja de esta cuenca, no siendo igual para el Mchique, cuya distribución muestra mayor presencia de área a mayor altitud (a partir de los 3750m.s.n.m.)

En la tabla 19 se muestra el resumen de los parámetros geomorfológicos obtenidos de la cuenca Anya y Mchique.

**Tabla 19: Parámetros geomorfológicos de las cuencas Anya y Mchique**

PARAMETRO		Unidad	CUENCA		
			ANYA	MCHIQUE	
<b>De relieve</b>	Superficie	Km <sup>2</sup>	47.26	28.29	
	Perímetro	Km <sup>2</sup>	43.27	54.57	
	Pendiente media de la cuenca	%	28.65	21.54	
	Altitud media ponderada de la cuenca	msnm	3589	3827	
	Altitud máxima	msnm	4330	4248	
	Altitud mínima	msnm	3218	3271	
	Rectángulo equivalente	Lado menor	Km	2.47	1.08
		Lado mayor	Km	19.19	26.21
	Coefficiente de masividad	m/km <sup>2</sup>	0.61	0.76	
<b>De forma</b>	Coefficiente de compacidad	-	1.77	2.89	
	Factor de forma	-	0.22	0.14	
	Relación de elongación	-	0.8	1.05	
	Relación de circularidad	-	0.32	0.12	
<b>De drenaje</b>	Longitud del cauce principal	Km	14.66	14.22	
	Pendiente equivalente constante del cauce principal	%	1.07	2.12	
	Orden de la cuenca	-	4	3	
	Frecuencia de corriente	-	5.03	1.52	
	Densidad de drenaje	Km/Km <sup>2</sup>	2.2	1.63	
	Extensión media del escurrimiento	Km	0.11	0.15	
	Coefficiente de torrencialidad	-	20.62	36.1	
	Relación de bifurcación	-	1.97	2.45	
	Tiempo de concentración	H	6	5.35	

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó el mapa 2 de cobertura y uso de suelo de las cuencas Anya y Mchique, para ver la distribución de estas a nivel de subcuenca, dando como resultado:

### **Cuenca Anya**

- En la subcuenca 1 se observa una mayor distribución de cultivos agrícolas y de césped de puna/pajonal siendo el bosque mixto y la población insignificantes, en la subcuenca 2 se presenta una mayor distribución de césped de puna/pajonal y en la subcuenca 3 los cultivos agrícolas son los que presentan mayor distribución. Un resumen de los porcentajes de las coberturas y uso de suelo se presentan en la tabla 20.

**Tabla 20: Distribución de las Coberturas y uso de suelo en la cuenca Anya**

<b>Cobertura y uso de suelo</b>	<b>Cuenca Anya</b>		
	<b>subcuenca 1</b>	<b>subcuenca 2</b>	<b>subcuenca 3</b>
Cultivos agrícolas	43%	18 %	52 %
Bosque mixto	4 %	14 %	5 %
Césped de puna/Pajonal	50 %	66 %	24 %
Población	3 %	2 %	19 %

Fuente: Elaboración propia

### **Cuenca Mchique**

- En la subcuenca 1 se observa que los cultivos agrícolas y el césped de puna/pajonal son las coberturas que presentan mayor distribución, en la subcuenca 2 y 3 los cultivos agrícolas son los que presentan una mayor distribución, siendo la población insignificante. Un resumen de los porcentajes de las coberturas y uso de suelo se presentan en la tabla 21.

**Tabla 21: Distribución de las Coberturas y uso de suelo en la cuenca Anya**

<b>Cobertura y uso de suelo</b>	<b>Cuenca Mchique</b>		
	<b>subcuenca 1</b>	<b>subcuenca 2</b>	<b>subcuenca 3</b>
Cultivos agrícolas	50 %	57 %	60 %
Césped de puna/Pajonal	48 %	39 %	39 %
Población	2 %	4 %	1 %

Fuente: Elaboración propia

Estos porcentajes de distribución de las diferentes coberturas que presentan cada cuenca son importantes ya que estos son un factor que influye en la humedad del suelo.

## 5.2. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN, HUMEDAD DEL SUELO, CAUDALES MEDIOS DIARIOS Y DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

### 5.2.1. Información pluviométrica

Las series temporales de las estaciones Tambo, Colpar, Quilcas, Sincos, Chacrampa y Cruzpampa se presentan en las Figuras 34-39 del Anexo 2.1 Dichas series fueron obtenidas a través de la descarga directa de la data correspondiente a cada una de las estaciones.

- El análisis exploratorio de datos (AED) de las series de precipitación diaria de las estaciones: *Tambo, Colpar, Quilcas, Cruzpampa, Chacrampa y Sincos*; mediante parámetros *estadísticos*, estos se presentan en la tabla 22. Dicho análisis mostró ligeras variaciones entre las medias de cada serie, para el periodo Diciembre 2013 – Marzo 2015; sin embargo, la estación *Sincos* presentó la media más baja (1.9 *mm*). Por otro lado, la varianza muestral de las series de precipitación diaria presentó valores máximos de 30.7 y 23.2 (Tambo y Chacrampa, respectivamente) y mínimos de 17.4 y 16.9 (Quilcas y Sincos, respectivamente); siendo esto indicativo de mayor dispersión de la precipitación diaria en estaciones ubicadas en la margen izquierda del río Mantaro. Asimismo, la mediana resultó mayor en las estaciones Colpar (0.8 *mm*), debido a la mayor dispersión de valores de precipitación total diaria a lo largo de los 16 meses de estudio; sin embargo, las estaciones restantes presentaron valores bajos cercanos a cero. La moda fue cero para todas las estaciones analizadas, debido a la predominancia de días sin precipitación (0.00 *mm*) dentro del periodo de tiempo estudiado.

**Tabla 22: Estadísticas descriptivas de las estaciones  
(Diciembre 2013 – Marzo 2015)**

	QUILCAS	COLPAR	TAMBO	SINCOS	CHACRAMPA	CRUZPAMPA
N Datos	486.0	486.0	486.0	486.0	486.0	486.0
Media	2.3	3.0	3.4	1.9	2.8	2.8
Desv. Stand.	4.2	4.8	5.5	4.1	4.8	4.8
Varianza	17.4	23.1	30.7	16.9	23.2	22.6
Mediana	0.2	0.8	0.4	0.0	0.4	0.6
Moda	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

- En las Figuras 40 y 41 del anexo 2.1 se pueden apreciar la variación espacial de la media y varianza, también se puede ver que estas están relacionadas directamente a la variación altitudinal, siendo las estaciones ubicadas a mayor altitud (Tambo, Cruzpampa y Chacrampa), las de mayor varianza, mientras que las estaciones que están a menos 3400 msnm (Quilcas y Sincos), son las que tiene menor varianza; se puede decir entonces que las estaciones ubicadas al margen izquierdo del río Mantaro tiene una mayor variabilidad en relación a días secos y húmedos para el periodo de evaluación, en la Tabla 23 se resume los valores de media y varianza de la precipitación.

**Tabla 23: Variación espacial de la media y varianza de la precipitación (Diciembre 2013-Marzo2015)**

Estación	Altitud (msnm)	Precipitación total (mm)	Media (mm)	Varianza
Tambo(*)	4097	1652.68	3.4	30.7
Cruzpampa	3894	1375.66	2.8	22.6
Chacrampa	3619	1361.64	2.8	23.2
Colpar (*)	3509	1479.24	3	23.1
Quilcas (*)	3355	1099.4	2.3	17.4
Sincos	3328	900.06	1.9	16.9

(\*) Estaciones ubicadas en la margen izquierda del río Mantaro

Fuente: Elaboración propia

- El análisis exploratorio de datos de datos realizado a las series de precipitación diaria de las estaciones Quilca, Colpar, Tambo, Sincos, Chacrampa y Cruzpampa (Diciembre 213-Marzo 2015), mediante las gráficas de distribución de frecuencia presentes en las Figuras 42-47 del Anexo 2.1, se muestra una clara asimetría en las distribuciones; ello, principalmente, debido a la escala diaria de trabajo, tomando en cuenta la predominancia de días con valor de precipitación nula (0.00 mm).
- Las gráficas de distribución acumulada se presentan en las Figuras 48-53 del Anexo 2.1, estas muestran la distribución de la precipitación total diaria (Diciembre 2013-Marzo 2015) para las estaciones en estudio. Se puede apreciar que los días sin precipitación (0.00 mm) tienen una frecuencia acumulada que varía de 78 a 81 % para las estaciones Sincos, Chacrampa y Cruzpampa (ubicadas en la margen derecha); de 73 a 78% para las estaciones Quilcas, Colpar y Tambo (ubicadas en el

margen izquierdo).

- En la tabla 24 se muestra los valores del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) para las estaciones en estudio llevadas para el análisis diario de la precipitación (Diciembre 2013-Marzo 2015). Para todas las correlaciones se usó un  $n$  de 485. Se puede apreciar que existe una alta correlación entre las estaciones que se encuentran más cerca (espacialmente) unas de otras. Una representación gráfica del resultado de las correlaciones y su respectivo coeficiente de Pearson ( $r$ ) se muestra en la Figura 54 del anexo 2.1.

**Tabla 24: Matriz de correlaciones ( $r$ ) de la precipitación total diaria (Diciembre 2013-Marzo 2015)**

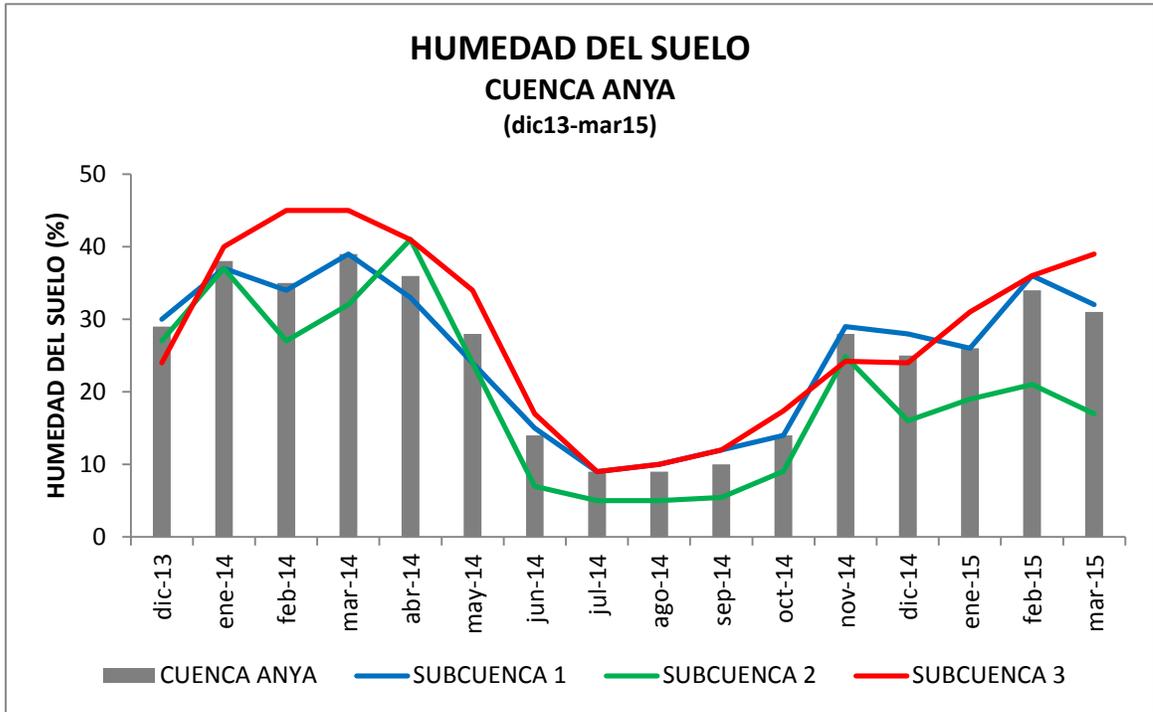
	<b>Tambo</b>	<b>Colpar</b>	<b>Quilcas</b>	<b>Cruzpampa</b>	<b>Chacrampa</b>	<b>Sincos</b>
<b>Tambo</b>	1.000					
<b>Colpar</b>	0.738	1.000				
<b>Quilcas</b>	0.568	0.738	1.000			
<b>Cruzpampa</b>	0.524	0.563	0.434	1.000		
<b>Chacrampa</b>	0.474	0.581	0.473	0.711	1.000	
<b>Sincos</b>	0.302	0.496	0.483	0.499	0.636	1.000

Fuente: Elaboración propia

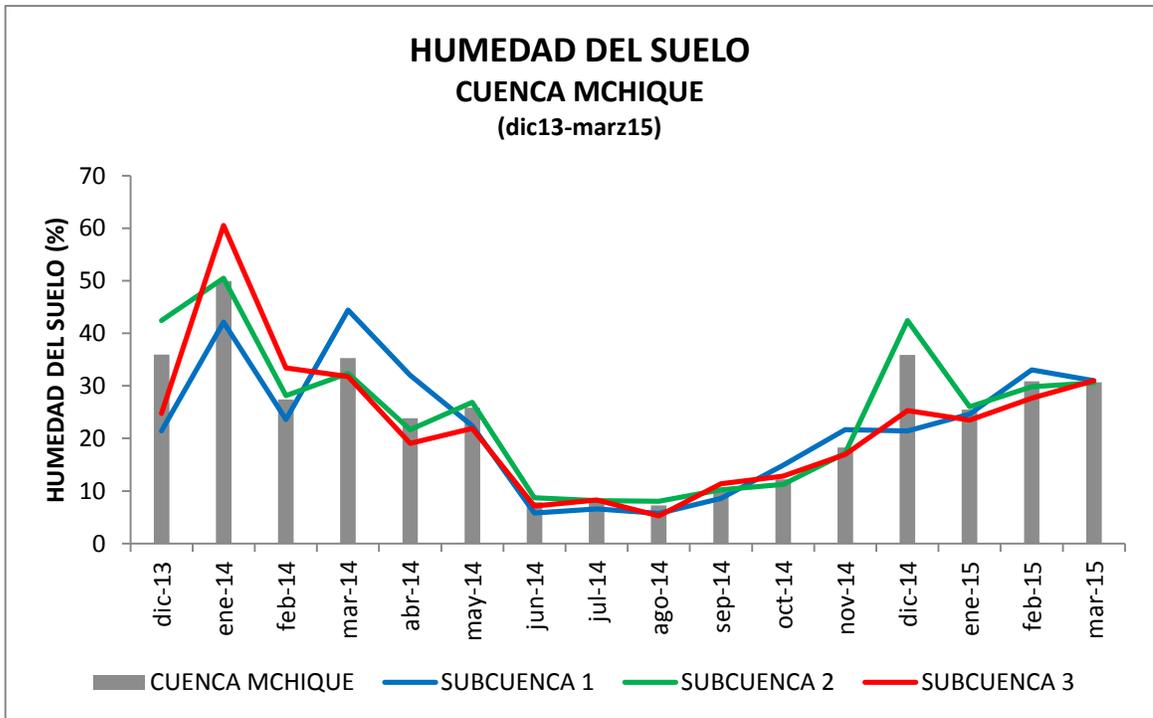
### 5.2.2. Información de la humedad del suelo

Para analizar la humedad del suelo, primero se localizaron puntos de muestreo de datos distribuidos alrededor de ambas cuencas tal como se muestran en las Figuras 55 y 56 del anexo 2.2, luego se realizaron mapas de humedad (Figuras 57-88 del anexo 2.2) con cada medición que se tenía en los diferentes puntos de las cuencas (las mediciones se realizaron una vez al mes por 16 meses en total), con estos mapas se pudo obtener una humedad promedio en cada subcuenca y a su vez a nivel de cuenca. Cabe resaltar que esta investigación contó con un monto designado por el proyecto VLIR, y es mediante este que se consideró tomar mediciones una vez al mes para el periodo Dic 2013-Mar2015.

- Las series temporales de la humedad del suelo se hicieron a nivel de subcuenca y de cuenca, tal como se presentan a continuación en las Figuras 89 y 90. Dichas series se obtuvieron a partir de los mapas de humedad como ya se mencionó anteriormente, con el propósito de ser simuladas mediante los sistemas de modelación hidrológica Hec Hms y R.S. Minerve.



**Figura 89** Serie temporal de la humedad del suelo de la cuenca Anya



**Figura 90:** Serie temporal de la humedad del suelo de la cuenca Mchique

- El análisis de exploratorio de datos, se hizo de las series de humedad del suelo para cada subcuenca de la cuenca Anya y Mchique; mediante parámetros *estadísticos*, estos se presentan en la Tabla 25 , se muestra una ligera variación entre las medias de cada subcuenca, siendo la más baja la de la subcuenca 2 de la cuenca Anya (19.8 %). La varianza muestral de las series presentan valores máximos de 246.4 (subcuenca 3 de la cuenca Anya) y 183.9 (subcuenca 3 de la cuenca Mchique), y mínimos de 189.7 (subcuenca 1 de la cuenca Anya) y 147.5 (subcuenca 2 de la cuenca Mchique); indicativo de mayor dispersión de la humedad del suelo en las subcuencas de la margen izquierdo del río Mantaro, en comparación de las del margen derecho. También se observó que la máxima humedad es de 44.7 % (subcuenca 3 de la cuenca Anya) en el mes de Marzo 2014 y de 60 % (subcuenca 3 de la cuenca Mchique) en el mes de Enero 2014; así también el valor mínimo de la humedad es de 5.2 % (subcuenca 2 de la cuenca Anya) en el mes de Julio 2014 y de 5.3 % (subcuenca 3 de la cuenca Mchique) en el mes de Agosto 2014. La variación espacial de la media y de la varianza de cada subcuenca se presentan en las Figuras 91 y 92 del anexo 2.2, estas están influenciadas por la precipitación, cobertura y uso de suelo antes mencionados.

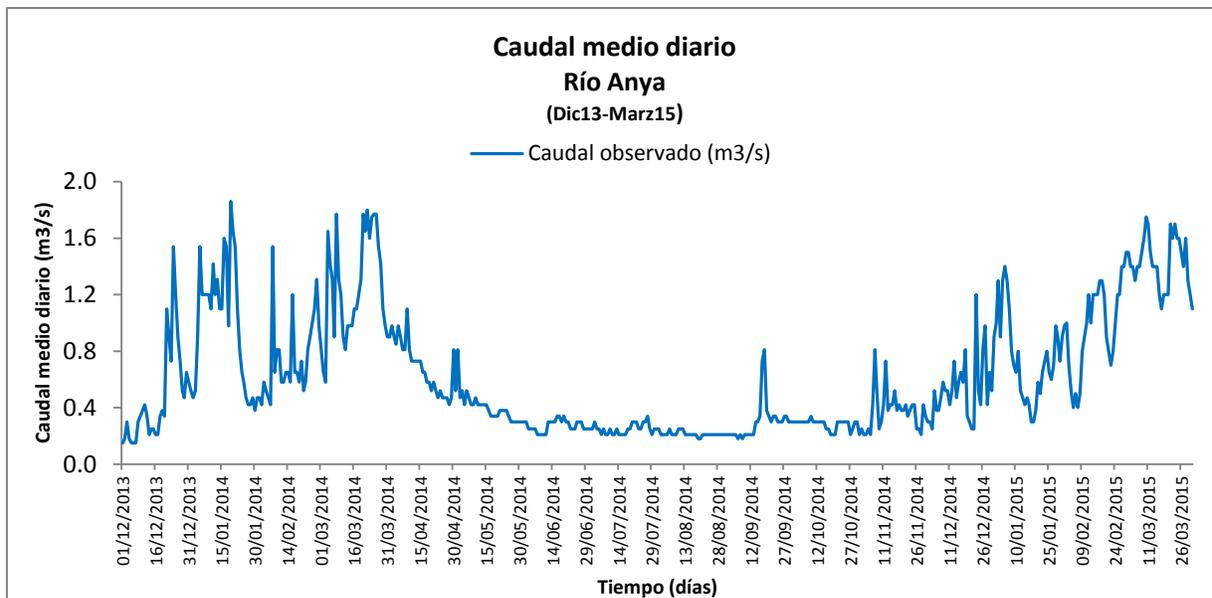
**Tabla 25: Estadísticas descriptivas de las subcuencas de la cuenca Anya y Mchique**

	Cuenca Anya			Cuenca Mchique		
	Subcuenca 1	Subcuenca 2	Subcuenca 3	Subcuenca 1	Subcuenca 2	Subcuenca 3
<b>N° Datos</b>	16	16	16	16	16	16
<b>Media</b>	25.4	19.8	28.1	24.7	22.5	22.5
<b>Des. Stand</b>	13.8	14.4	15.7	13.4	12.1	13.6
<b>Varianza</b>	189.7	207.3	246.4	179.6	147.5	183.9
<b>Mediana</b>	28.2	19.9	28.4	26.5	22	22.7
<b>Max. Valor</b>	39.2	40.7	44.7	50.5	44.4	60
<b>Min. valor</b>	9.1	5.2	9.4	8.1	5.7	5.3

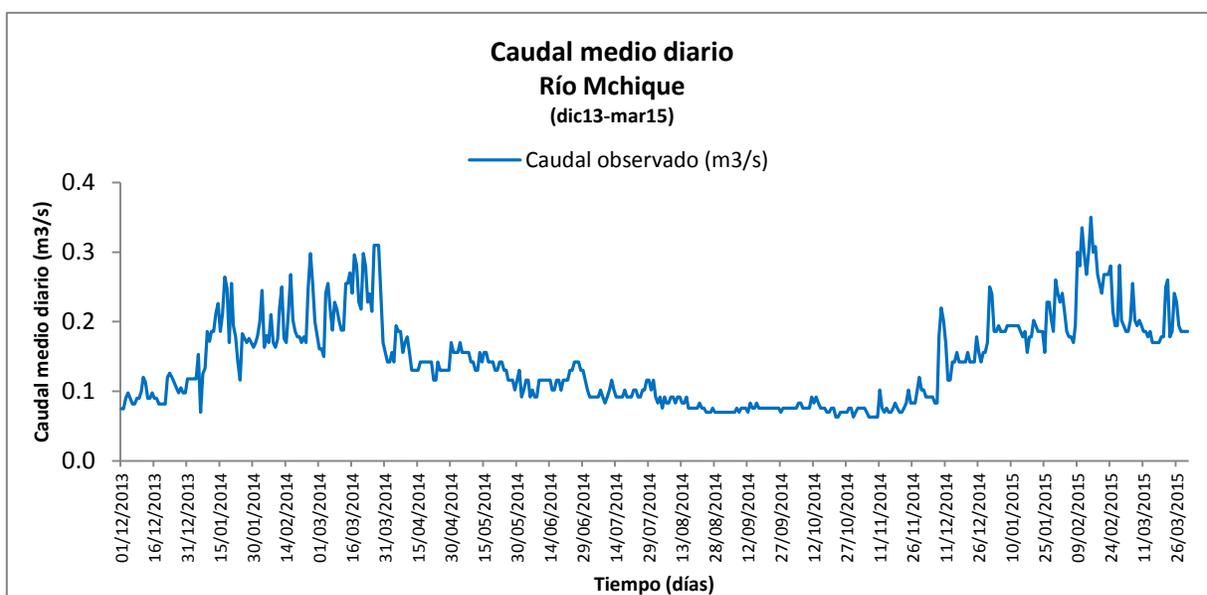
Fuente: Elaboración propia

### 5.2.3. Información Hidrométrica

Las estaciones hidrométricas Anya y Mchique se presentan en las Fotos 9 y 11 del anexo 4, a partir de ellas, se determinaron los caudales medios diarios observados para el periodo Diciembre 2013-Marzo 2015, tal como se presentan a continuación en las Figuras 93 y 94, posteriormente mediante los modelos Hec-Hms y R.S Minerve se simulará este comportamiento .



**Figura 93:** Caudales medios diarios observados del río Anya, periodo dic13-mar15



**Figura 94:** Caudales medios diarios observados del río Mchique, periodo dic13-mar15

- **Curva de calibración de caudales**

- La curva de calibración de caudales de la estación hidrométrica Anya se muestra en la Figura 95 del anexo 2.3. La ecuación de calibración altura-caudal para dicha estación hidrométrica resultó:  $Q = 22.66 * (H - 0.017)^{2.997}$ . El coeficiente de correlación (r) entre los caudales aforados y caudales simulados por la curva de calibración es de 0.79, el cual representa una significancia de 0.01 (n=11, r=0.73).
- La curva de calibración de caudales de la estación hidrométrica Mchique se muestra en la Figura 96 del anexo 2.3. La ecuación de calibración altura-caudal para dicha estación hidrométrica resultó:  $Q = 0.899 * (H - 0.0025)^{1.1381}$ . El coeficiente de correlación (r) entre los caudales aforados y caudales simulados por la curva de calibración es de 0.77, el cual representa una significancia de 0.01 (n=15, r=0.66)
- Las secciones de los ríos Anya y Mchique se presentan en las Figuras 97 y 98 del Anexo 2.3. Ambas secciones transversales presentan modificaciones de socavación poco significativas a lo largo del año, sin embargo, la presencia de sedimentos y gravas modifican constantemente la sección de los ríos, especialmente el del río Mchique.

- **Análisis exploratorio de datos**

- El análisis exploratorio de las series de las estaciones Anya y Mchique, mediante parámetros estadísticos presentes en la tabla 26, muestra la gran variación que existe entre las medias de las estaciones Anya y Mchique (0.62 y 0.14 m<sup>3</sup>/s, respectivamente), esto debido al tamaño de cada una de las cuencas en relación a su área drenada. Hay una mayor variabilidad de caudales diarios en la estación Anya ya que la varianza de esta es mucho mayor que el de la estación Mchique, al tener una varianza casi de 0 se puede decir que casi no hay variabilidad en los caudales medios diarios de la estación Mchique. El valor de la mediana de la estación Anya resulta mayor al de la estación Mchique, el valor de la moda de la estación Anya se encuentra más alejada de su mediana, en comparación a la estación Mchique.

**Tabla 26: Estadísticas descriptivas de las series de caudales diarios  
(Diciembre 2013-Marzo 2015)**

	<b>ANYA</b>	<b>MCHIQUE</b>
<b>N° Datos</b>	486.00	486.00
<b>Media</b>	0.62	0.14
<b>Desv. Stand.</b>	0.43	0.06
<b>Varianza</b>	0.19	0.003
<b>Mediana</b>	0.42	0.13
<b>Moda</b>	0.30	0.08

Fuente: Elaboración propia

#### 5.2.4. Evapotranspiración de referencia

- Las series temporales de la evapotranspiración de referencia diaria obtenidas a partir de la información climáticas de las estaciones Colpar y Chacrampa (diciembre 2013-marzo 2015) se presenta en las Figuras 99 y 100 del anexo 2.4.
- El análisis exploratorio de las series de evapotranspiración de referencia diaria, mediante el análisis de parámetros estadísticos presentes en la tabla 27, muestran una ligera variación entre los valores de las medias de las series Colpar y Chacrampa (2.75 y 3.06 mm, respectivamente), no encontrándose una variación espacial significativa

**Tabla 27: Estadísticas descriptivas de las series de evapotranspiración de referencia diaria (Diciembre 2013-Marzo 2015)**

	<b>Colpar</b>	<b>Chacrampa</b>
<b>N° Datos</b>	486.00	486.00
<b>Media</b>	2.75	3.06
<b>Desv. Stand.</b>	0.80	0.80
<b>Varianza</b>	0.64	0.63
<b>Mediana</b>	2.69	3.12
<b>Moda</b>	2.80	3.76

Fuente: Elaboración propia

### 5.3. DE LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS

#### 5.3.1. Sistema de modelación hidrológica (SMH)-Hec-Hms

##### a) Para la cuenca Anya

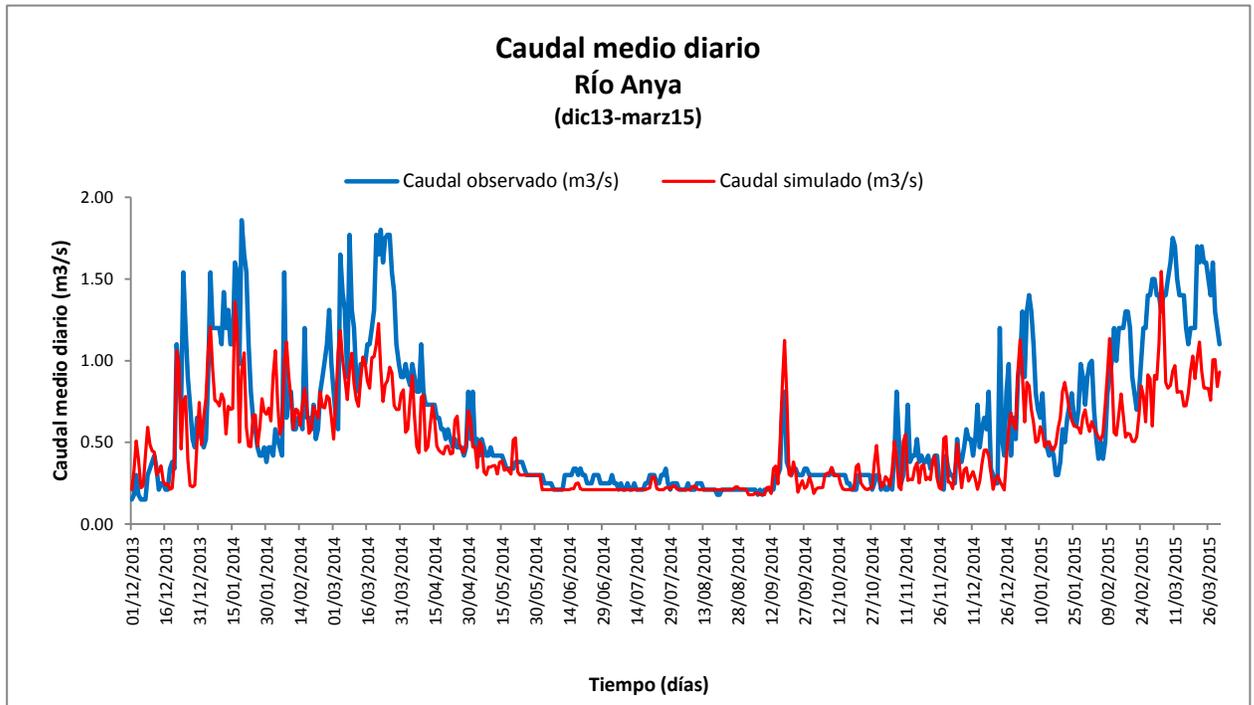
- **Simulación de Caudales**

- Se obtuvo un coeficientes de Nash Sutcliffe (n) de 0.57 y 0.55 para la calibración y validación respectivamente; permitiendo calificar al modelo como *bueno*; más aún, tratándose de un modelo construido a escala diaria. Por otro lado, los coeficientes de correlación de Pearson (r) mostraron valores aceptables de 0.82 y 0.83 para la calibración y validación respectivamente. Asimismo, el error medio (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) mostraron valores aceptables de -0.117 y 0.279 (calibración), y valores de -0.144 y 0.292 (validación), también se mostraron valores satisfactorios para el error de los valores picos normalizados (NPE) siendo estos de -0.269 y -0.117 para la calibración y validación respectivamente. Finalmente, el error volumétrico (%v) arrojó valores con déficit; de -17.88 % y -22.85 % para la calibración y validación respectivamente. La Tabla 28 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste del modelo hidrológico de la cuenca Anya; mientras que en las Figuras 101-103 del anexo 3.1 se muestran la gráfica de caudales observados y simulados, los caudales simulados acumulados, y la gráfica de precipitación–descarga–tiempo para el modelo de la cuenca.

**Tabla 28: Parámetros estadísticos, modelo Hec-Hms de la cuenca Anya (Simulación de caudales)**

	<b>Calibración (Dic.2013-Jul.2014)</b>	<b>Validación (Ago.2014-Marz.2015)</b>
<b>COEF. NASH</b>	0.57	0.55
<b>r</b>	0.82	0.83
<b>MBE</b>	-0.117	-0.144
<b>RMBE</b>	0.279	0.292
<b>NPE</b>	-0.269	-0.117
<b>%V</b>	-17.88	-22.85

Fuente: Elaboración propia



**Figura 101:** Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic13-mar15

- **Simulación de la humedad del suelo**

- Se obtuvo coeficientes de Nash Sutcliffe ( $n$ ) de 0.15 y 0.26 para la calibración y validación respectivamente; permitiendo calificar al modelo como insatisfactorio. Por otro lado, se obtuvieron valores medianamente aceptables en los coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) los cuales fueron de 0.55 y 0.63 para la calibración y validación respectivamente, así como también en el error medio (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) los cuales fueron de -3.2 y 9.7 (calibración), y de -0.2 y 7.6 (validación). Finalmente, el error volumétrico (%v) arrojó valores con déficit; de -11.4 % y -0.9 % para la calibración y validación respectivamente. La Tabla 29 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste de la simulación de la humedad del suelo de la cuenca Anya; mientras que en la Figura 104 del anexo 3.1 se muestran las gráficas de la humedad del suelo observada- simulada.

**Tabla 29: Parámetros estadísticos, modelo Hec-Hms de la cuenca Anya (Simulación de la humedad del suelo)**

	<b>Calibración (Dic.2013-Jul.2014)</b>	<b>Validación (Ago.2014-Marz.2015)</b>
<b>COEF. NASH</b>	0.15	0.26
<b>r</b>	0.55	0.63
<b>MBE</b>	-3.2	-0.2
<b>RMBE</b>	9.7	7.6
<b>%V</b>	-11.4	-0.9

Fuente: Elaboración propia

- El resumen de los parámetros del modelo de pérdidas Soil Moisture Accounting se muestra en la tabla 30, los cuales se asumieron de acuerdo a las características de la cuenca, luego se calibraron usando los caudales medios diarios y la humedad del suelo obtenida en campo. La tasa de infiltración máxima y la cubierta vegetal tienen significativa influencia para las descargas, mientras que para la humedad simulada, es el almacenamiento del suelo y la tasa de percolación los que tienen mayor significancia. La tasa de infiltración máxima se asumió valores entre 8-10 mm/hr, de acuerdo al suelo franco arcilloso de la zona en estudio. Los valores de la interceptación de la cubierta vegetal, y de las depresiones superficiales, tomaron valores entre 0.5 y 1 mm. El almacenamiento en el perfil del suelo y en la zona de tensión, tuvieron una relación aproximada de 1:2, en base a una porosidad de 46% y una profundidad de 2.5 m. La tasa máxima de percolación del suelo, la tasa de percolación subterránea máxima, el almacenamiento subterráneo y el coeficiente subterráneo, asumieron valores a partir de la calibración del modelo, los caudales medios diarios observados y de la humedad del suelo obtenida en campo.

**Tabla 30: Parámetros calibrados del submodelo de pérdidas, modelo continuo Hec-Hms de la cuenca Anya**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Subcuenca</b>		
		<b>Sub_1</b>	<b>Sub_2</b>	<b>Sub_3</b>
Intercepción de la cubierta vegetal	mm	0.5	1.0	0.5
Intercepción de las depresiones superficiales	mm	0.5	1.0	0.5
Tasa de infiltración máxima	mm/hr	8	10	8
Almacenamiento total del suelo	mm	80	90	120

Almacenamiento en la zona de tensión	mm	30	50	50
Tasa de percolación máxima del suelo	mm/hr	0.42	0.43	0.41
Almacenamiento subterráneo máximo	mm	100	240	100
Tasa de percolación subterránea máximo	mm/hr	0.4	0.5	0.4
Coefficiente subterráneo	hr	100	200	200

Fuente: Elaboración propia

- Se realizaron análisis de sensibilidad tanto para las descargas como para la humedad del suelo, estos análisis se hicieron para los 9 parámetros mencionados anteriormente, los cuales se presentan en las Figuras 105-108 del anexo 3.1, para la eficiencia de Nash Sutcliffe y el coeficiente de correlación de Pearson, respectivamente. Se muestra que la intercepción en la cubierta vegetal y la tasa de infiltración máxima, resultan los parámetros más importantes respecto a la simulación de las descargas, mientras que el almacenamiento total del suelo y en la zona de tensión, son los que influyen más en la simulación de la humedad del suelo; los parámetros restantes solo produjeron leves variaciones en los estadísticos analizados.

#### **b) Para la cuenca Mchique**

- **Simulación de Caudales**

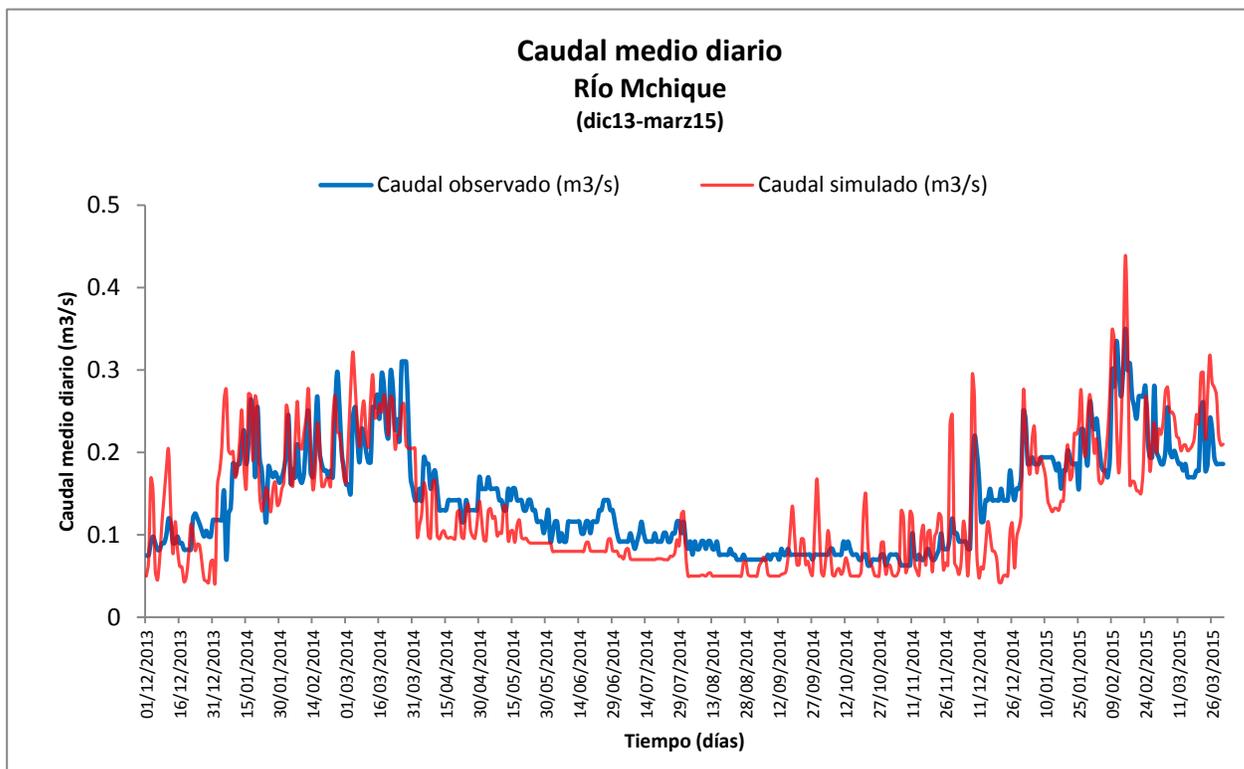
- Se obtuvo un coeficientes de Nash Sutcliffe (n) de 0.45 y 0.60 para la calibración y validación respectivamente; permitiendo calificar al modelo como *bueno*; más aún, tratándose de un modelo construido a escala diaria. Por otro lado, los coeficientes de correlación de Pearson (r) mostraron valores aceptables de 0.81 y 0.84 para la calibración y validación respectivamente. Asimismo, el error medio (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) mostraron valores buenos de 0.003 y 0.039 (calibración), y valores de 0.005 y 0.044 (validación), también se mostraron valores satisfactorios para el error de los valores picos normalizados (NPE) siendo estos de -0.026 y 0.128 para la calibración y validación respectivamente. Finalmente, el error volumétrico (%v) arrojó valores con déficit; de -12 % y -10.56 % para la calibración y validación respectivamente. La Tabla 31 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste del modelo hidrológico de la cuenca Anya;

mientras que en las Figuras 109-111 del anexo 3.1 se muestran la gráfica de caudales observados y simulados, los caudales simulados acumulados, y la gráfica de precipitación–descarga–tiempo para el modelo de la cuenca.

**Tabla 31: Parámetros estadísticos, modelo Hec-Hms de la cuenca Mchique (Simulación de caudales)**

	<b>Calibración (Dic.2013-Jul.2014)</b>	<b>Validación (Ago.2014-Marz.2015)</b>
<b>COEF. NASH</b>	0.45	0.60
<b>R</b>	0.81	0.84
<b>MBE</b>	0.003	0.005
<b>RMBE</b>	0.039	0.044
<b>NPE</b>	-0.026	0.128
<b>%V</b>	-12.00	-10.56

Fuente: Elaboración propia



**Figura 109:** Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic13-mar15

- **Simulación de la humedad del suelo**

- Se obtuvo coeficientes de Nash Sutcliffe (n) de 0.12 y 0.11 para la calibración y validación respectivamente; permitiendo calificar al modelo como insatisfactorio. Por otro lado, se obtuvieron valores medianamente aceptables en los coeficientes de correlación de Pearson (r) los cuales fueron de 0.75 y 0.40 para la calibración y validación respectivamente, así como también en el error medio (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) los cuales fueron de -5.66 y 12.56 (calibración), y de 1.04 y 9.37 (validación). Finalmente, el error volumétrico (%v) arrojó valores con déficit; de -21.55 % y 4.97 % para la calibración y validación respectivamente. La Tabla 32 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste de la simulación de la humedad del suelo de la cuenca Anya; mientras que en las Figura 112 del anexo 3.1 se muestran las gráficas de la humedad del suelo observada-simulada.

**Tabla 32: Parámetros estadísticos, modelo Hec-Hms de la cuenca Mchique (Simulación de la humedad del suelo)**

	<b>Calibración (Dic.2013-Jul.2014)</b>	<b>Validación (Ago.2014-Marz.2015)</b>
<b>COEF. NASH</b>	0.12	0.11
<b>r</b>	0.75	0.40
<b>MBE</b>	-5.66	1.04
<b>RMBE</b>	12.56	9.37
<b>%V</b>	-21.55	4.97

Fuente: Elaboración propia

- El resumen de los parámetros del modelo de pérdidas Soil Moisture Accounting se muestra en la tabla 33, los cuales se asumieron de acuerdo a las características de la cuenca, luego se calibraron usando los caudales medios diarios y la humedad del suelo obtenida en campo. La tasa de infiltración máxima y la cubierta vegetal tienen significativa influencia para las descargas, mientras que para la humedad simulada, es el almacenamiento del suelo y la tasa de percolación los que tienen mayor significancia. La tasa de infiltración máxima se asumió valores entre 8-10 mm/hr, de acuerdo al suelo franco arcilloso de la zona en estudio. Los valores de la intercepción

de la cubierta vegetal, y de las depresiones superficiales, tomaron valores entre 0.5 y 1 mm. El almacenamiento en el perfil del suelo y en la zona de tensión, tuvieron una relación aproximada de 1:2, en base a una porosidad de 46.5% y una profundidad de 2.5 m. La tasa máxima de percolación del suelo, la tasa de percolación subterránea máxima, el almacenamiento subterráneo y el coeficiente subterráneo, asumieron valores a partir de la calibración del modelo, los caudales medios diarios observados y de la humedad del suelo obtenida en campo.

**Tabla 33: Parámetros calibrados del submodelo de pérdidas, modelo continuo Hec-Hms de la cuenca Mchique**

Parámetro	Unidad	Subcuenca		
		Sub_1	Sub_2	Sub_3
Intercepción de la cubierta vegetal	mm	1.0	0.5	1.0
Intercepción de las depresiones superficiales	mm	1.0	1.0	0.5
Tasa de infiltración máxima	mm/hr	8	8	8
Almacenamiento total del suelo	mm	90	76	90
Almacenamiento en la zona de tensión	mm	38	30	40
Tasa de percolación máxima del suelo	mm/hr	0.57	0.57	0.57
Almacenamiento subterráneo máximo	mm	190	150	130
Tasa de percolación subterránea máximo	mm/hr	0.8	0.8	0.5
Coeficiente subterráneo	Hr	600	700	600

Fuente: Elaboración propia

- Se realizaron análisis de sensibilidad tanto para las descargas como para la humedad del suelo, estos análisis se hicieron para los 9 parámetros mencionados anteriormente, los cuales se presentan en las Figuras 113-116 del anexo3.1, para la eficiencia de Nash Sutcliffe y el coeficiente de correlación de Pearson, respectivamente. Se muestra que la intercepción en la cubierta vegetal y la tasa de infiltración máxima, resultan los parámetros más importantes respecto a la simulación de las descargas, mientras que el almacenamiento total del suelo y en la zona de tensión, son los que influyen más en la simulación de la humedad del suelo; los parámetros restantes solo produjeron leves variaciones en los estadísticos analizados.

### 5.3.2. Sistema de modelación hidrológica (SMH)- R.S-Minerve

#### a) Para la cuenca Anya

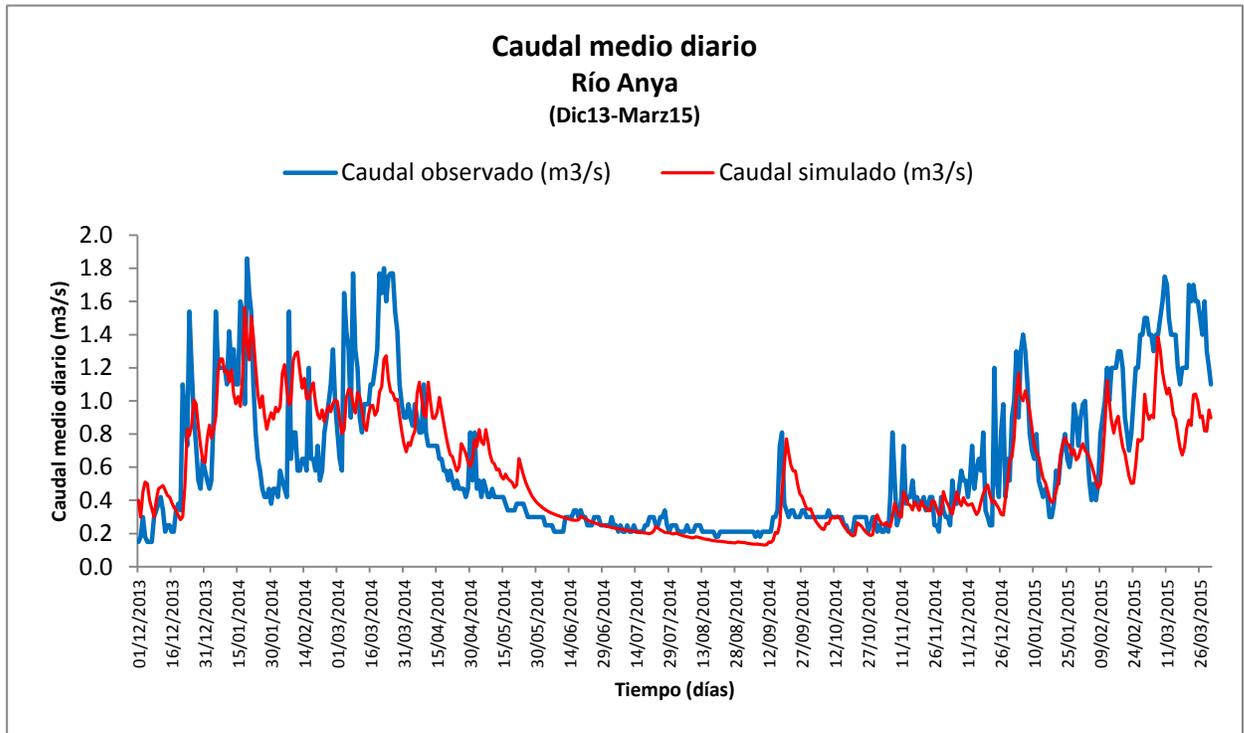
- **Simulación de Caudales**

- Se obtuvo un coeficientes de Nash Sutcliffe (n) de 0.55 y 0.66 para la calibración y validación respectivamente; permitiendo calificar al modelo como *bueno*; más aún, tratándose de un modelo construido a escala diaria. Por otro lado, los coeficientes de correlación de Pearson (r) mostraron valores aceptables de 0.76 y 0.88 para la calibración y validación respectivamente. Asimismo, el error medio (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) mostraron valores aceptables de 0.052 y 0.288 (calibración), y valores de -0.12 y 0.257 (validación), también se mostraron valores satisfactorios para el error de los valores picos normalizados (NPE) siendo estos de -0.16 y -0.2 para la calibración y validación respectivamente. Finalmente, el error volumétrico (%v) arrojó valores de 8.1 % y -20.4 % para la calibración y validación respectivamente. La Tabla 34 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste del modelo hidrológico de la cuenca Anya; mientras que en las Figuras 117-119 del anexo 3.2 se muestran la gráfica de caudales observados y simulados, los caudales simulados acumulados, y la gráfica de precipitación–descarga–tiempo para el modelo de la cuenca.

**Tabla 34: Parámetros estadísticos, modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya (Simulación de caudales)**

	<b>Calibración (Dic.2013-Jul.2014)</b>	<b>Validación (Ago.2014- Marz.2015)</b>
<b>COEF. NASH</b>	0.55	0.66
<b>r</b>	0.76	0.88
<b>MBE</b>	0.052	-0.12
<b>RMBE</b>	0.288	0.257
<b>NPE</b>	-0.16	-0.20
<b>%V</b>	8.1	-20.4

Fuente: Elaboración propia



**Figura 118:** Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic13-mar15

- **Simulación de la humedad del suelo**
- Se obtuvo coeficientes de Nash Sutcliffe ( $n$ ) de 0.62 y 0.55 para la calibración y validación respectivamente; permitiendo calificar al modelo como bueno. Por otro lado, se obtuvieron valores óptimos en los coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) los cuales fueron de 0.87 y 0.82 para la calibración y validación respectivamente, así como también en el error medio (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) los cuales fueron de -0.46 y 7.56 (calibración), y de -0.34 y 6.11 (validación). Finalmente, el error volumétrico (%v) arrojó valores de -1.61 % y -1.18 % para la calibración y validación respectivamente. La Tabla 35 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste de la simulación de la humedad del suelo de la cuenca Anya; mientras que en la Figura 120 del anexo 3.2 se muestran las gráficas de la humedad del suelo observada vs. simulada.

**Tabla 35: Parámetros estadísticos, modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya (Simulación de la humedad del suelo)**

	<b>Calibración (Dic.2013-Jul.2014)</b>	<b>Validación (Ago.2014-Marz.2015)</b>
<b>COEF. NASH</b>	0.62	0.55
<b>r</b>	0.87	0.82
<b>MBE</b>	-0.46	-0.34
<b>RMBE</b>	7.56	6.11
<b>%V</b>	-1.61	-1.18

Fuente: Elaboración propia

- El resumen de las condiciones iniciales y de los parámetros a calibrar del modelo HBV del SMH R.S-Minerve se muestran en la tabla 36, los cuales se asumieron de acuerdo a las características de la cuenca y a los rangos de valores que nos recomienda el programa, luego se calibraron usando los caudales medios diarios y los datos de humedad del suelo obtenida en campo. Los parámetros relacionados a la temperatura (CFMax, CFR, CWH, TT, TTInt, TTSM) se consideraron de acuerdo al rango de valores que nos indica el programa, de acuerdo a esto el valor de  $TT + TTInt/2$  es menor que la temperatura observada en las estaciones Tambo, Colpar y Quilcas (Figuras 121-123 del anexo 3.2), lo cual significa según el modelo que solo se producirá lluvia mas no nieve sólida. Por lo tanto los parámetros considerados a calibrar son: el parámetro del modelo (Beta), la capacidad de campo (FC), punto de marchitez permanente (PWP), el umbral del nivel de agua del reservorio superior (SUMax), el coeficiente del almacenamiento cerca de la superficie (Kr), coeficiente de almacenamiento del interflujo (Ku), coeficiente de almacenamiento del flujo base (Kl) y el coeficiente de almacenamiento de la percolación (Kperc), los cuales tomaron valores de acuerdo a las características de la cuenca y al rango de valores recomendados por el programa. Por otro lado al presentarse solo lluvia, los parámetros iniciales como la altura de nieve (HsnowIni) y el contenido relativo inicial de la capa de nieve (WHIni) tomaron un valor de 0 m, la humedad inicial (HIni) tomo valores de 0.2 a 0.3 m, estos de acuerdo a los datos obtenidos en campo, los valores del nivel de agua en el reservorio superior e inferior (SUIni, SLIni) se asumieron a partir de la calibración del modelo y de los caudales diarios observados.

**Tabla 36: Condiciones iniciales y parámetros calibrados del modelo HBV, del SMH R.S-Minerve de la cuenca Anya**

<b>Parámetros a calibrar</b>	<b>Unidad</b>	<b>Sub_1</b>	<b>Sub_2</b>	<b>Sub_3</b>
CFMax	mm/°C/s/día	5	5	5
CFR	-	1	1	1
CWH	-	0.1	0.1	0.1
TT	°C	2	2	2
TTInt	°C	2	2	2
TTSM	°C	0	0	0
Beta	-	1.4	1.7	1.1
FC	m	0.5	0.5	0.65
PWP	m	0.4	0.38	0.55
SUMax	m	0.08	0.08	0.08
Kr	1/d	0.3	0.3	0.5
Ku	1/d	0.105	0.01	0.09
Kl	1/d	0.009	0.02	0.0009
Kperc	1/d	0.08	0.1	0.17
<b>Condiciones Iniciales</b>	<b>Unidad</b>	<b>Sub_1</b>	<b>Sub_2</b>	<b>Sub_3</b>
HsnowIni	m	0	0	0
WHIni	-	0	0	0
HumIni	m	0.2	0.24	0.3
SUIni	m	0.001	0.05	0.05
SLIni	m	0.05	0.05	0.05

Fuente: Elaboración propia

- Se realizaron análisis de sensibilidad tanto para las descargas como para la humedad del suelo, estos análisis se hicieron para los 8 parámetros mencionados anteriormente (Beta, FC, PWM, SUMax, Kr, Ku, Kl y Kperc), los cuales se presentan en las Figuras 124-127 del anexo 3.2, para la eficiencia de Nash Sutcliffe y el coeficiente de correlación de Pearson, respectivamente. Se muestra que el parámetro del modelo (beta) y la capacidad de máximo almacenamiento (FC), resultan los parámetros más importantes respecto a la simulación de las descargas, mientras que la capacidad de máximo almacenamiento (FC) y el punto de marchitez, son los que influyen más en la simulación de la humedad del suelo; los parámetros restantes solo produjeron leves variaciones en los estadísticos analizados.

## b) Para la cuenca Mchique

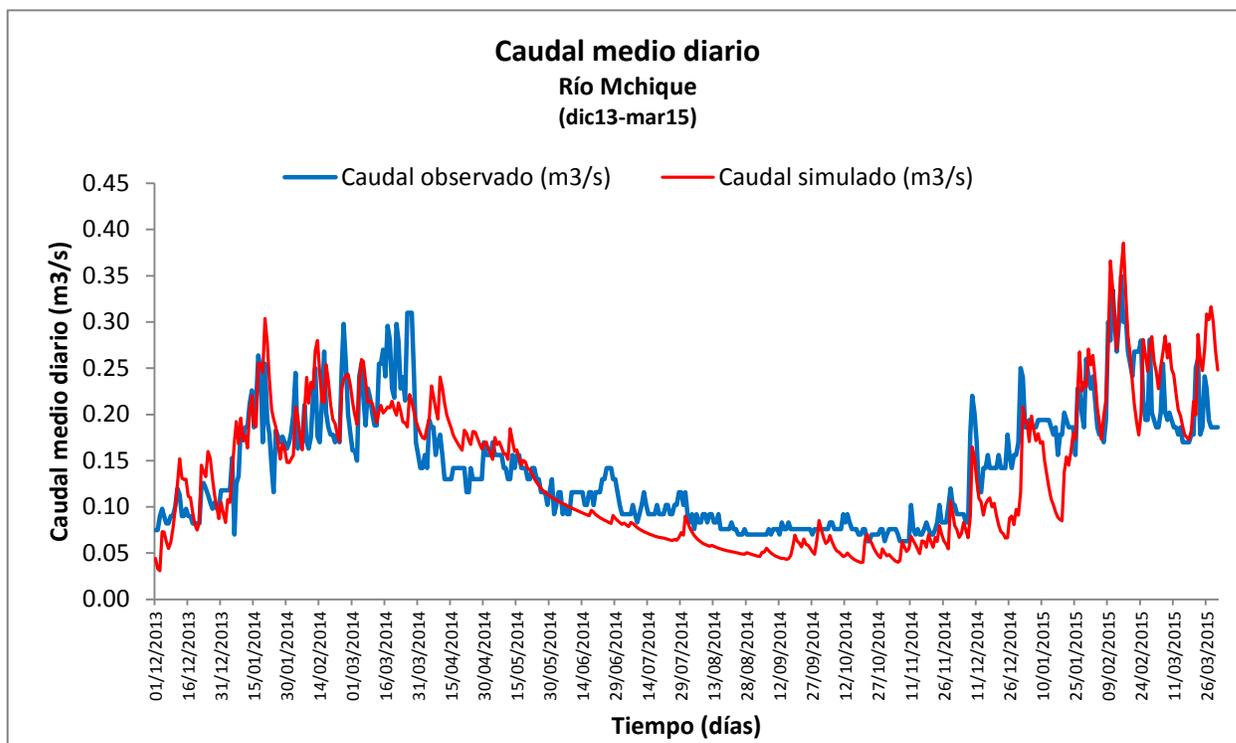
### • Simulación de Caudales

- Se obtuvo un coeficientes de Nash Sutcliffe (n) de 0.68 y 0.65 para la calibración y validación respectivamente; permitiendo calificar al modelo como *bueno*; más aún, tratándose de un modelo construido a escala diaria. Por otro lado, los coeficientes de correlación de Pearson (r) mostraron valores aceptables de 0.85 y 0.89 para la calibración y validación respectivamente. Asimismo, el error medio (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) mostraron valores aceptables de -0.004 y 0.03 (calibración), y valores de -0.019 y 0.042 (validación), también se mostraron valores satisfactorios para el error de los valores picos normalizados (NPE) siendo estos de -0.12 y 0.02 para la calibración y validación respectivamente. Finalmente, el error volumétrico (%v) arrojó valores de -2.74 % y -14.2 % para la calibración y validación respectivamente. La Tabla 37 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste del modelo hidrológico de la cuenca Anya; mientras que en las Figuras 128-130 del anexo 3.2 se muestran la gráfica de caudales observados y simulados, los caudales simulados acumulados, y la gráfica de precipitación–descarga–tiempo para el modelo de la cuenca.

**Tabla 37: Parámetros estadísticos, modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique (Simulación de caudales)**

	<b>Calibración (Dic.2013-Jul.2014)</b>	<b>Validación (Ago.2014-Marz.2015)</b>
<b>COEF. NASH</b>	0.68	0.65
<b>r</b>	0.85	0.89
<b>MBE</b>	-0.004	-0.019
<b>RMBE</b>	0.030	0.042
<b>NPE</b>	-0.12	0.02
<b>%V</b>	-2.74	-14.2

Fuente: Elaboración propia



**Figura128:** Caudales medios diarios observados y simulados del río Mchique, periodo dic13-mar15

- **Simulación de la humedad del suelo**

- Se obtuvo coeficientes de Nash Sutcliffe ( $n$ ) de 0.41 y 0.60 para la calibración y validación respectivamente; permitiendo calificar al modelo como bueno. Por otro lado, se obtuvieron valores óptimos en los coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) los cuales fueron de 0.73 y 0.78 para la calibración y validación respectivamente, así como también en el error medio (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) los cuales fueron de 2.2 y 10 (calibración), y de 0.9 y 6.4 (validación). Finalmente, el error volumétrico (%v) arrojó valores de 8.1 % y 4.3 % para la calibración y validación respectivamente. La Tabla 38 muestra el resumen de cada una de las medidas de bondad de ajuste de la simulación de la humedad del suelo de la cuenca Anya; mientras que en la Figura 131 del anexo 3.2 se muestran las gráficas de la humedad del suelo observada vs. la simulada.

**Tabla 38: Parámetros estadísticos, modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique (Simulación de la humedad del suelo)**

	<b>Calibración (Dic.2013-Jul.2014)</b>	<b>Validación (Ago.2014- Marz.2015)</b>
<b>COEF. NASH</b>	0.41	0.60
<b>r</b>	0.73	0.78
<b>MBE</b>	2.2	0.9
<b>RMBE</b>	10.0	6.4
<b>%V</b>	8.1	4.3

Fuente: Elaboración propia

- El resumen de las condiciones iniciales y de los parámetros a calibrar del submodelo HBV del R.S-Minerve se muestran en la tabla 39, los cuales se asumieron de acuerdo a las características de la cuenca y a los rangos de valores que nos recomienda el programa, luego se calibraron usando los caudales medios diarios y los datos de humedad del suelo obtenida en campo. Los parámetros relacionados a la temperatura (CFMax, CFR, CWH, TT, TTInt, TTSM) se consideraron de acuerdo al rango de valores que nos indica el programa, de acuerdo a esto el valor de  $TT + TTInt/2$  es menor que la temperatura observada en las estaciones Sincos, Chacrampa y Cruzpampa (Figuras 132-134 del anexo 3.2), lo cual significa según el modelo que solo se producirá lluvia mas no nieve sólida. Por lo tanto los parámetros considerados a calibrar son: el parámetro del modelo (Beta), la capacidad de campo (FC), punto de marchitez permanente (PWP), el umbral del nivel de agua del reservorio superior (SUMax), el coeficiente del almacenamiento cerca de la superficie (Kr), coeficiente de almacenamiento del interflujo(Ku), coeficiente de almacenamiento del flujo base (Kl) y el coeficiente de almacenamiento de la percolación (Kperc), los cuales tomaron valores de acuerdo a las características de la cuenca y al rango de valores recomendados por el programa. Por otro lado al presentarse solo lluvia, los parámetros iniciales como la altura de nieve (HsnowIni) y el contenido relativo inicial de la capa de nieve (WHIni) tomaron un valor de 0 m, la humedad inicial (HIni) tomo valores de 0.18 a 0.2 m, estos de acuerdo a los datos obtenidos en campo, los valores del nivel de agua en el reservorio superior e inferior (SUIni, SLIni) se asumieron a partir de la calibración del modelo y de los caudales diarios observados.

**Tabla 39: Condiciones iniciales y parámetros calibrados del modelo HBV, del SMH R.S-Minerve de la cuenca Mchique**

<b>Parámetros a calibrar</b>	<b>Unidad</b>	<b>Sub_1</b>	<b>Sub_2</b>	<b>Sub_3</b>
CFMax	mm/°C/s/día	5	5	5
CFR	-	1	1	1
CWH	-	0.1	0.1	0.1
TT	°C	2	2	2
TTInt	°C	2	2	2
TTSM	°C	0	0	0
Beta	-	2.7	1.55	1.6
FC	m	0.65	0.765	0.65
PWP	m	0.35	0.429	0.5
SUMax	m	0.01	0.04	0.05
Kr	1/d	0.3	0.3	0.3
Ku	1/d	0.057	0.08	0.01
Kl	1/d	0.009	0.009	0.01
Kperc	1/d	0.16	0.18	0.02
<b>Condiciones Iniciales</b>	<b>Unidad</b>	<b>Sub_1</b>	<b>Sub_2</b>	<b>Sub_3</b>
HsnowIni	m	0	0	0
WHIni	-	0	0	0
HumIni	m	0.18	0.225	0.2
SUIni	m	0.003	0.006	0.002
SLIni	m	0.006	0.003	0.001

Fuente: Elaboración propia

- Se realizaron análisis de sensibilidad tanto para las descargas como para la humedad del suelo, estos análisis se hicieron para los 8 parámetros mencionados anteriormente (Beta, FC, PWM, SUMax, Kr, Ku, Kl y Kperc), los cuales se presentan en las Figuras 135-138 del anexo 3.2, para la eficiencia de Nash Sutcliffe y el coeficiente de correlación de Pearson, respectivamente. Se muestra que el parámetro del modelo (Beta) y la capacidad de máximo almacenamiento (FC), resultan los parámetros más importantes respecto a la simulación de las descargas, mientras que la capacidad de máximo almacenamiento (FC) y el punto de marchitez, son los que influyen más en la simulación de la humedad del suelo; los parámetros restantes solo produjeron leves variaciones en los estadísticos analizados.

#### 5.4. COMPARACIÓN DE LA SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO ENTRE LOS SISTEMAS DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA (SMH) HEC-HMS Y R.S-MINERVE

Según la simulación de caudales y de la humedad del suelo por los SMH Hec-Hms y R.S-Minerve y en base solo los parámetros estudiados en campo, especialmente la humedad del suelo, se puede apreciar una clara diferencia en los resultados de las simulaciones, notando principalmente un mejor desempeño en la simulación de la humedad del suelo y caudales mediante el SMH R.S-Minerve, ya que este tiene una mayor capacidad para simular la humedad del suelo según los parámetros estudiados, a continuación en las tablas 40-43 se muestran un resumen de los parámetros estadísticos de ambos modelos tanto en el periodo de calibración (Diciembre 2103-Julio 2014) como en el de validación (Agosto 2014-Marzo 2015) y en las figuras 139-144 del anexo 3.2, se aprecian gráficos comparativos para la simulación de la humedad del suelo y de caudales con Hec Hms y R.S Minerve, así como también un gráfico de precipitación vs caudales y humedad del suelo para cada cuenca.

**Tabla 40: Comparación entre los SMH Hec-Hms y R.S-Minerve en la simulación de humedad del suelo en la cuenca Anya**

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	SMH HEC-HMS		SMH R.S-MINERVE	
	CALIB. (Dic13-Jul14)	VALID. (Ago14-Mar15)	CALIB. (Dic13-Jul14)	VALID. (Ago14-Mar15)
COEF. NASH	0.15	0.26	0.62	0.55
R	0.55	0.63	0.87	0.82
MBE	-3.2	-0.2	-0.46	-0.34
RMBE	9.7	7.6	7.56	6.11
%V	-11.4	-0.9	-1.61	-1.18

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 41: Comparación entre los SMH Hec-Hms y R.S-Minerve en la simulación de los caudales en la cuenca Anya**

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	SMH HEC-HMS		SMH R.S-MINERVE	
	CALIB. (Dic13-Jul14)	VALID. (Ago14-Mar15)	CALIB. (Dic13-Jul14)	VALID. (Ago14-Mar15)
<b>COEF. NASH</b>	0.57	0.55	0.55	0.66
<b>r</b>	0.82	0.83	0.76	0.88
<b>MBE</b>	-0.117	-0.144	0.052	-0.12
<b>RMBE</b>	0.279	0.292	0.288	0.257
<b>NPE</b>	-0.269	-0.117	-0.16	-0.20
<b>%V</b>	-17.88	-22.85	8.1	-20.4

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 42: Comparación entre los SMH Hec-Hms y R.S-Minerve en la simulación de la humedad del suelo en la cuenca Mchique**

PARAMETROS ESTADISTICOS	SMH HEC-HMS		SMH R.S-MINERVE	
	CALIB. (Dic13-Jul14)	VALID. (Ago14-Mar15)	CALIB. (Dic13-Jul14)	VALID. (Ago14-Mar15)
<b>COEF. NASH</b>	0.12	0.11	0.41	0.60
<b>r</b>	0.75	0.40	0.73	0.78
<b>MBE</b>	-5.66	1.04	2.2	0.9
<b>RMBE</b>	12.56	9.37	10.0	6.4
<b>%V</b>	-21.55	4.97	8.1	4.3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 43: Comparación entre los SHM Hec-Hms y R.S-Minerve en la simulación de los caudales en la cuenca Mchique**

PARAMETROS ESTADISTICOS	SMH HEC-HMS		SMH R.S-MINERVE	
	CALIB. (Dic13-Jul14)	VALID. (Ago14-Mar15)	CALIB. (Dic13-Jul14)	VALID. (Ago14-Mar15)
<b>COEF. NASH</b>	0.45	0.60	0.68	0.65
<b>R</b>	0.81	0.84	0.85	0.89
<b>MBE</b>	0.003	0.005	-0.004	-0.019
<b>RMBE</b>	0.039	0.044	0.030	0.042
<b>NPE</b>	-0.026	0.128	-0.12	0.02
<b>%V</b>	-12.00	-10.56	-2.74	-14.2

Elaboración: Fuente propia

El valor ideal para el coeficiente de Nash y para la correlación de Pearson es de 1, mientras que para los demás parámetros estadísticos (MBE, RMBE, NPE y %V) el valor ideal es 0, aunque estos valores solo son supuestos ideales se puede decir que mientras más se acerquen a estos, mejor será la simulación.

## VI. CONCLUSIONES

De acuerdo al estudio y análisis de la información hidrometeorológica y de la humedad del suelo recolectada directamente de campo, a partir de la instalación de 04 estaciones meteorológicas automáticas, 02 estaciones pluviométricas, 02 estaciones hidrométricas y de la utilización de 01 equipo TDR para el monitoreo de la humedad del suelo, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- 6.1. En base a la información hidrometeorológica y de humedad del suelo “in situ”, se puede determinar la influencia e importancia de la humedad del suelo en la relación Precipitación – Escorrentía. La presente investigación consideró la humedad del suelo para mejorar la calibración y validación de los modelos Hec-Hms y R.S Minerve. Mediante gráficas de correlación se puede observar la relación que hay entre la precipitación, humedad del suelo y caudales, teniéndose mayores caudales para una mayor precipitación y humedad del suelo (época de lluvias) y menores caudales para una menor precipitación y humedad del suelo (época de estiaje); en base a esto se puede decir que la integración de las observaciones in situ de la humedad del suelo proporcionan información útil en un modelo de precipitación-escorrentía, puesto que mejoran la predicción del hidrograma de escorrentía a nivel de cuenca.
  
- 6.2. Las características geomorfológicas que influyeron más en el escurrimiento superficial en ambas cuencas fueron la pendiente, el coeficiente de compacidad y la densidad de drenaje, por lo que se concluye que a pesar de que la cuenca Anya tiene una forma más regular (ovalada) que la cuenca Mchique (alargada), esta tiene una estructura fisiográfica más montañosa así como una mayor estructura en la red fluvial, la cual la hace más sensible a la variabilidad de caudales.

- 6.3. Según los parámetros estadísticos, la precipitación en las cuencas Anya y Mchique tiene un comportamiento similar, y su régimen espacial y temporal están relacionadas directamente a la variación altitudinal, en base a esto se puede decir, que para el periodo de evaluación hay una ligera mayor variabilidad en relación a días secos y húmedos, en la cuenca Anya que en la cuenca Mchique.
- 6.4. Referente al comportamiento de la humedad del suelo, ambas cuencas tienen una variación temporal similar influenciada directamente por la precipitación, teniendo la mayor humedad en el mes de Marzo para la cuenca Anya y Enero para la cuenca Mchique (época de lluvias de Noviembre-Abril), por otro lado la menor humedad fue en Julio para la cuenca Anya y en Agosto para la cuenca Mchique (época de estiaje de Mayo-October); se puede decir también que a pesar de tener una variación temporal similar en ambas cuencas hay una mayor variabilidad espacial en la cuenca Anya que en la Mchique debido a factores como la textura y la cobertura del suelo.
- 6.5. Respecto a los caudales medios diarios hay una mayor variabilidad en la cuenca Anya que en la Mchique debido al tamaño de cada una de ellas en relación a su área drenada, a la precipitación y a las condiciones de humedad del suelo.
- 6.6. Se logró aplicar satisfactoriamente la simulación del comportamiento hidrológico con Hec-Hms y R.S Minerve para evaluar y cuantificar los caudales en las cuencas del Anya y del Mchique, además se logró calibrar y validar ambos para el periodo de Diciembre 2013 – Marzo 2015 según los valores de parámetros de eficiencia y ajuste, obteniendo una mejor performance con el R.S Minerve.
- 6.7. Según la comparación entre la humedad obtenida directamente de campo (humedad observada) y la humedad simulada mediante los SMH Hec-hms y R.S Minerve se pudo determinar la incertidumbre en la simulación de la humedad del suelo, con lo cual se pudo notar que el SMH Hec Hms no logra simular adecuadamente la humedad del suelo en especial en el periodo seco (Mayo-October), esto debido a limitaciones propias de este. Respecto al SMH R.S Minerve, se puede observar una mejora en el

desempeño de la simulación de la humedad del suelo, tanto para el periodo seco como húmedo. El SMH R.S Minerve nos facilita el proceso de calibración y validación ya que nos brinda un rango de valores a considerar para cada parámetro, cosa que no pasa con el SMH Hec-Hms. Por lo tanto basados solo en la información obtenida de campo y de los resultados de la evaluación realizada en ambos modelos, concluimos que hay una menor incertidumbre al realizar la simulación de la humedad del suelo mediante el modelo R.S Minerve que con el SMH Hec-Hms.

## VII. RECOMENDACIONES

- 7.1. Continuar con el monitoreo de las principales variables hidrometeorológicas a escala diaria y horaria, así como, seguir instrumentando las cuencas Anya y Mchique con registradores automáticos, estaciones meteorológicas, tensiómetros, equipos de medición de temperatura del suelo, etc; con la finalidad de obtener información para desarrollar futuros trabajos de investigación.
- 7.2. Para fines de la humedad del suelo, continuar con el proceso de monitoreo e implementar sensores para distribuirlos en toda la cuenca, con el fin de que proporcionen estimaciones fiables de la medida real, ya que al tener un mayor número de datos se pueden obtener mejores resultados en los parámetros de eficacia de los modelos hidrológicos.
- 7.3. Estudiar a mayor profundidad cada uno de los parámetros de los modelos SMA (Hec Hms) y HBV (R,S Minerve) como son la infiltración, percolación del suelo, entre otros. Esto con el fin de obtener mejoras en la simulación de la humedad de la suelo.
- 7.4. Estudiar y realizar una mayor investigación de la humedad del suelo de forma remota, ya que esta podría ser suficiente para el modelado de precipitación-escorrentía en otros escenarios (regiones áridas, semiáridas), siempre y cuando se conozca con precisión la variabilidad espacio-temporal de la precipitación.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Beven, K. 2012. Rainfall - Runoff Modelling. The Primer. 2 ed. United Kingdom, Wiley-Blackwell. 488 p.
2. Braud, I.; Fernandez, P.; Bouraoui, F., 1998. Study of the rainfall-runoff process in the Andes region using a continuous distributed model. Journal of Hydrology. 2016 (1999) 155-171.
3. Buytaert, W. Celleri, R. Willems, P. De Bievre, B. Wyseure, G. 2006. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. Journal of Hydrology. 329(2006): 413-421.
4. CAZALAC (Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe, CL)/PH-UNESCO (Programa Hidrológico Internacional - Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). s.f. Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe. s.e. 59 p.
5. Calvo N, 2011, Computación gráfica FICH.
6. Campos, D. F. 1992, Procesos del Ciclo Hidrológico, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 524pp.
7. Chow, VT.; Maidment, D.; Mays, L. 1994. Hidrología Aplicada. Colombia, McGraw-Hill, 584 p.
8. CVC (Corporación Autónoma del Valle del Cauca, CO). 2005. Manual de procedimientos hidrométricos. Colombia, s.e. 13 v. 165 p.
9. Escuela universitaria de ingeniería técnica agrícola de la ciudad real, (2000) Relación, agua-suelo-planta, 30p.
10. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Santiago, s.e. 265 p.

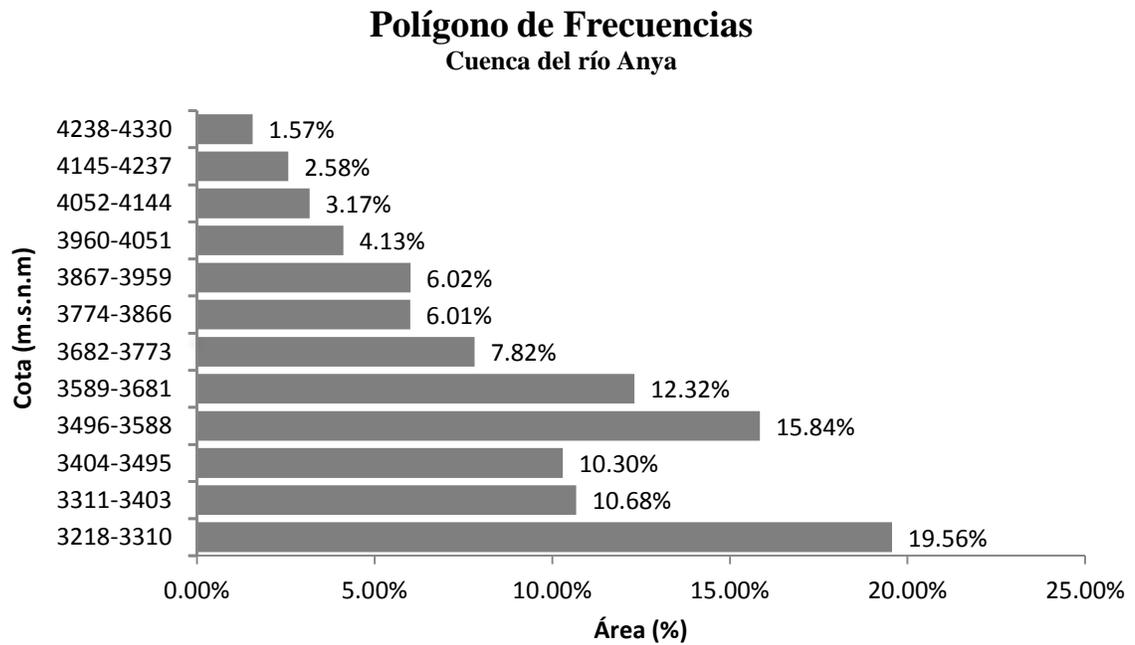
11. Fattorelli, S. Fernández P. 2011. Diseño Hidrológico. 2 ed. Argentina, s.e. 602 p.
12. Fattorelli S.; Pedro C. Fernández. 2011, Diseño Hidrológico 2da edición, p. 39-41.
13. Feldman, A., 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS – Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers. 148 p.
14. Fernández J, Sánchez J y L.H Cammeraat. 1994, La medida de la humedad del suelo mediante el método TDR (time domain reflectometry), Investigación en zona no saturada, Ed Moreli, 27 p
15. Foehn, A., García Hernández, J., Roquier, B. and Paredes Arquiola, J. (2015). RS MINERVE – User’s manual v1.18. RS MINERVE Group, Switzerland, 108 pp.
16. Franke, R. 1982. Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines. Computer and Mathematics with Applications. Vol. 8. N.º 4. pág. 273–281. Gran Bretaña.
17. Garay O.; Ochoa Á. Primera Aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelos agrícola en el valle del río Mantaro/Instituto Geofísico del Perú, 1ra ed., 2010. 33 p. ISBN 978-612-45795-2-3.
18. García Hernández, J., Paredes Arquiola, J., Foehn, A. and Roquier, B. (2015). RS MINERVE – Technical manual v1.14. RS MINERVE Group, Switzerland, 94 pp.
19. Grados, D. 2012. Estudio de avenidas en las cuencas del Anya y Mchique, departamento de Junín, Perú (periodo 2011-2012). Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional Agraria la Molina. 127 p.
20. Guía de Prácticas Hidrológicas/Organización Meteorológica Mundial - N°168, 5ta ed., 1994. 781 p. ISBN 92-63-30168-9.
21. INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales, PE)/ PSI (Programa Subsectorial de Irrigaciones, PE). 2005. Manual de hidrometría. Perú, s.e. 26 p.
22. Jones, S.B.; J.M. Wraith; D. Or. 2002. Time domain reflectometry measurement principle and applications. *Hydrology. Processes*, 16: 141-153.
23. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero, 2003. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI, Actas de las VI Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo - ZNS'03. ISBN, 84-688-3698 - 2. 414 pp.
24. *Journal of Hydrology* | Vol 510, Pgs 1-610

25. La fuente, J. 2013. Modelos para la precipitación diaria en el marco de los modelos lineales generalizados. Docto en. Universidad de Zaragoza. 311 p.
26. Ledesma, M. 2011. Principios de meteorología y climatología. España, Paraninfo. 552 p.
27. Llauca, H. 2013, Estudio de Balance Hídrico Superficial en las Cuencas Anya y Mchique, Departamento de Junín, Perú, Tesis Ing. Agrícola Perú, 271p.
28. Maidment, D. 1993. Handbook of Hydrology. 1st ed., United States of America, McGraw-Hill. 1424 p.
29. Martinez, J. 2012. Propagación de errores en cálculos hidrológicos con caudales obtenidos mediante curvas nivel-caudal construidas con una baja densidad de aforos líquidos. Magister en Hidrosistemas. Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá.
30. McEnroe, B. 2010. Guidelines for Continuous Simulation of Streamflow in Johnson County, Kansas, with HEC-HMS (en línea). Kansas, Johnson Country Public Works and Infrastructure Stormwater Manager Program Consultado 16 jun. 2013.
31. Mitas, L. y H. Mitasova. 1988. General Variational Approach to the Interpolation Problem. Computer and Mathematics with Applications. Vol. 16. N.º 12. pág. 983–992. Gran Bretaña.
32. Molnar, P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
33. Muñoz-Carpena, R. 2004. Field devices for monitoring soil water content. University of Florida, IFAS, Extension Bulletin 343, Florida, USA, 16 p.
34. Musy A.; Higy Ch., 2011. Hydrology, 1st ed., United States of America, Science Publishers. 315 p.
35. OMM (Organización de meteorológica mundial, CH). 2011. Guía de prácticas hidrológicas N 168. 6 ed. Suiza, s.e. 781 p. (ISB 978-92-63-30168-0).
36. Scharffenberger, W; Fleming, M., 2010. Hydrologic Modeling System HEC-HMS – User’s Manual. U.S. Army Corps of Engineers. 318 p.
37. T, Davie. 2008. Fundamentals of hydrology. 2 ed. London, Routledge. 199 p.
38. WMO (World Meteorological Organization, CH). 2010. Manual on stream gauging N° 1044. Switzerland, s.e. 252 p.

## IX. ANEXOS

### Anexo 1: Descripción de las características geomorfológicas y de la cobertura y uso de suelo de las cuencas Anya y Mchique

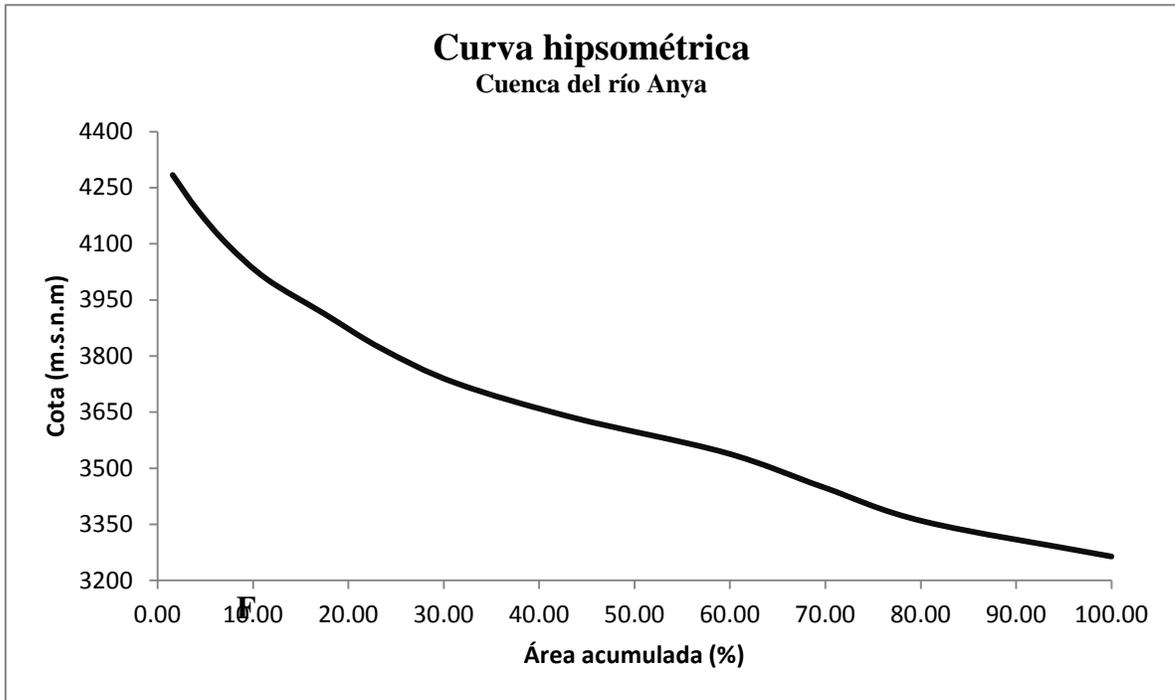
#### a) Geomorfología de las cuencas Anya y Mchique



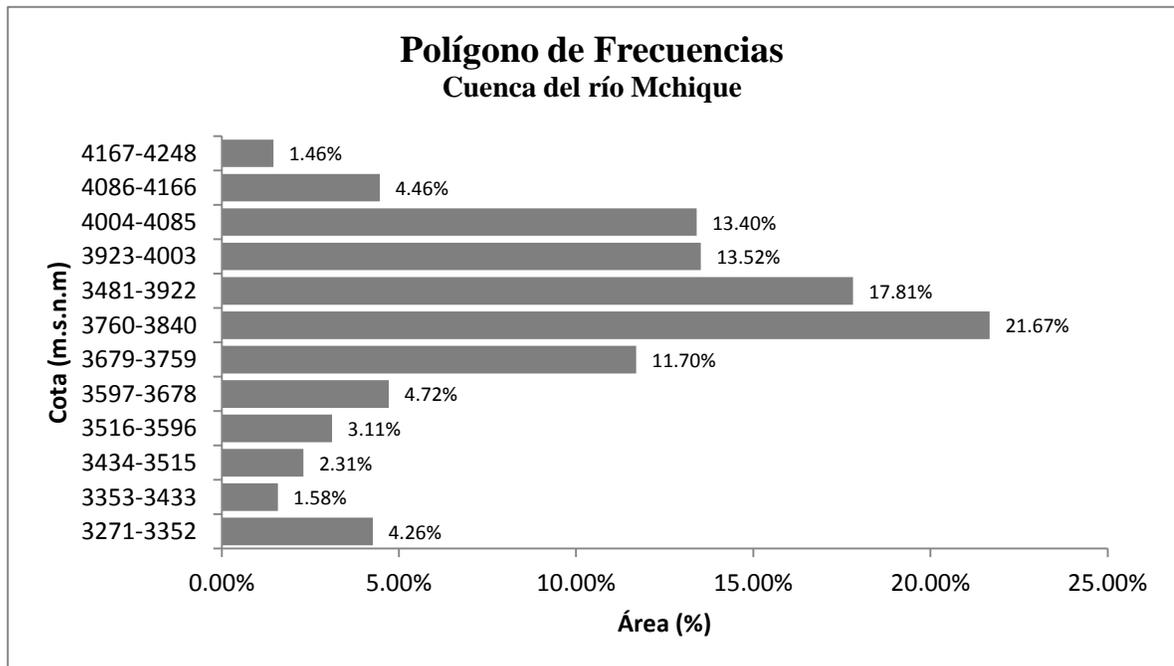
**Figura 28:** Polígono de frecuencias de la cuenca del río Anya



**Figura 29:** Rectángulo equivalente de la cuenca del río Anya

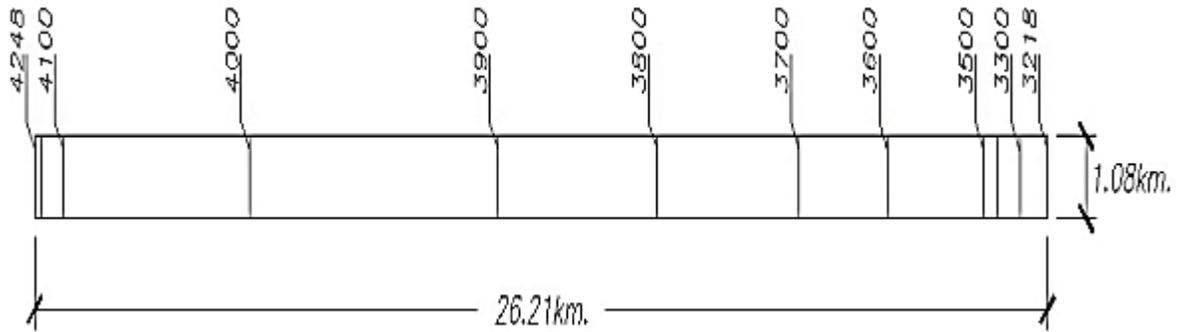


**Figura 30:** Curva hipsométrica de la cuenca del río Anya



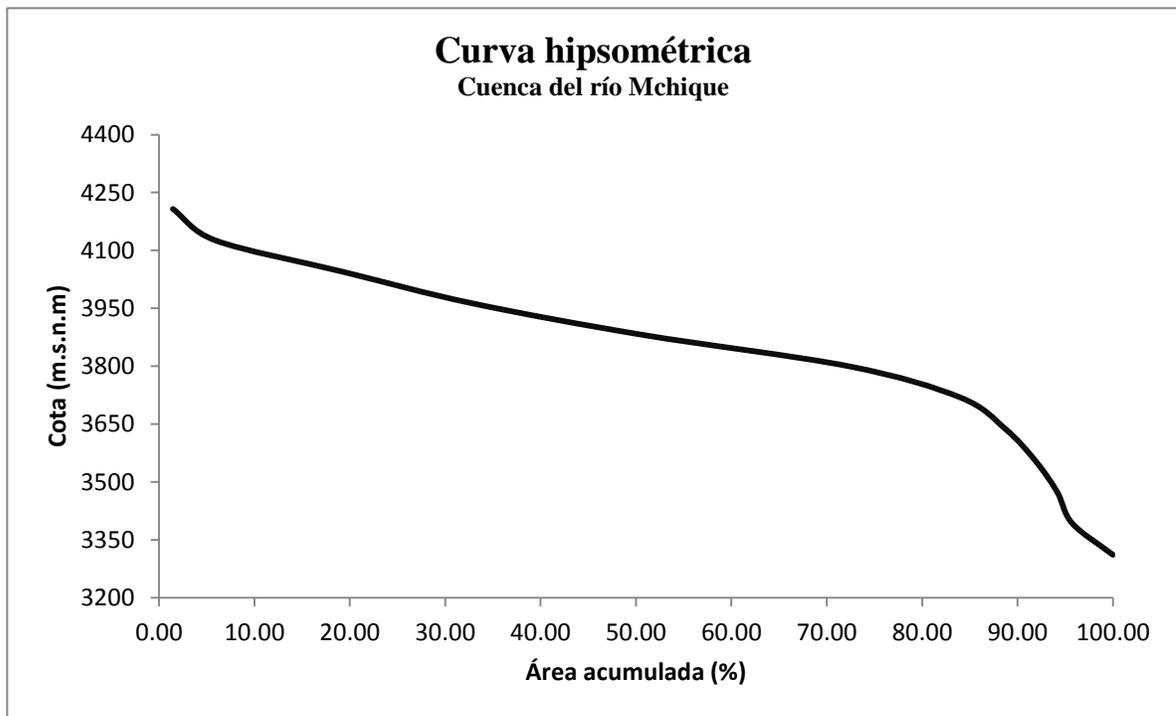
**Figura 31:** Polígono de frecuencias de la cuenca del río Mchique

**Rectángulo equivalente**  
Cuenca del río Mchique



**Figura 32:** Rectángulo equivalente de la cuenca del río Mchique

**Curva hipsométrica**  
Cuenca del río Mchique



**Figura 33:** Curva hipsométrica de la cuenca del río Mchique

## Anexo 2: De la descripción del comportamiento de la precipitación, humedad del suelo y de los caudales medios diarios

### Anexo 2.1: Pluviometría

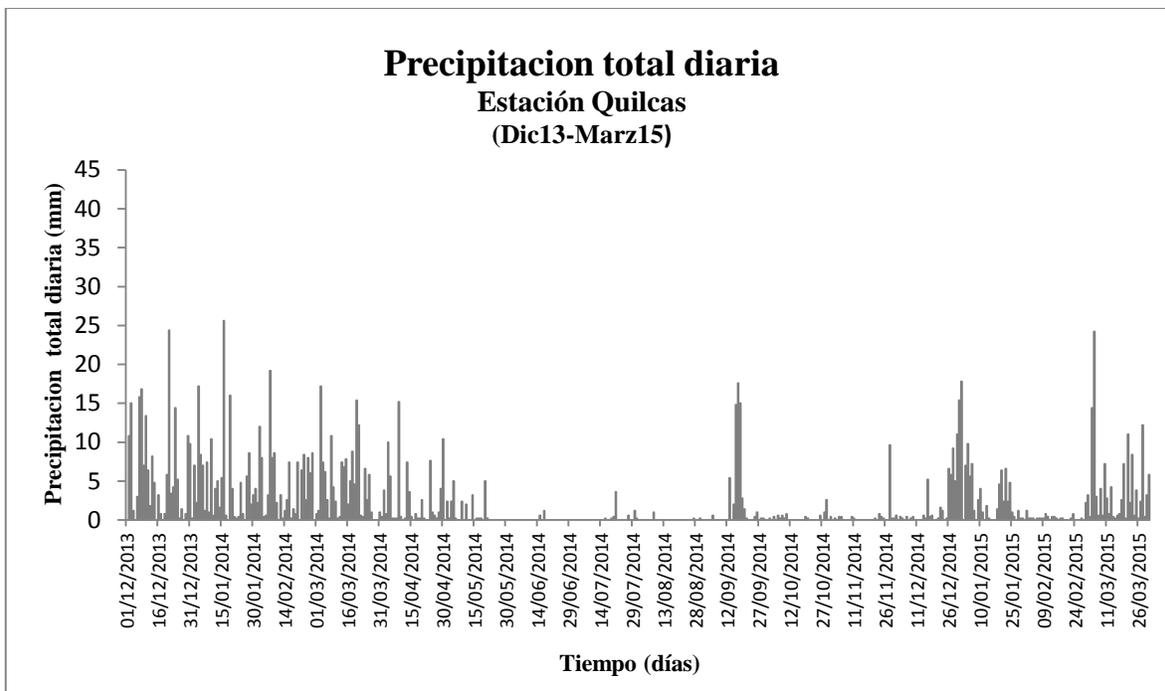


Figura 34: Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Quilcas

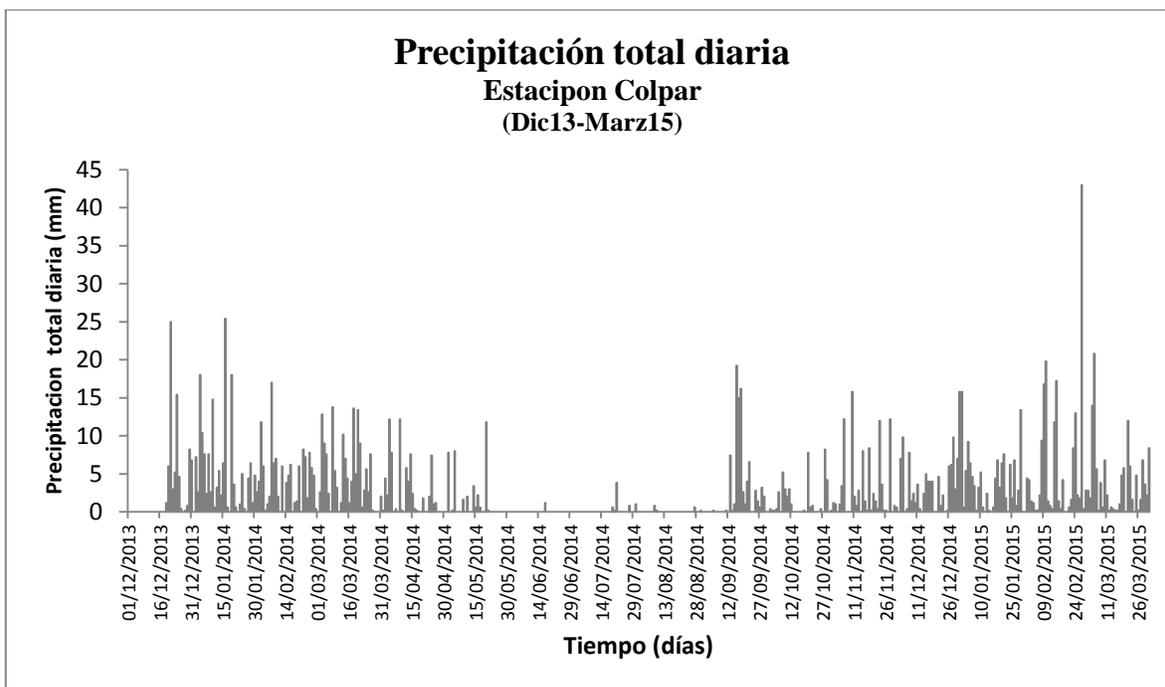
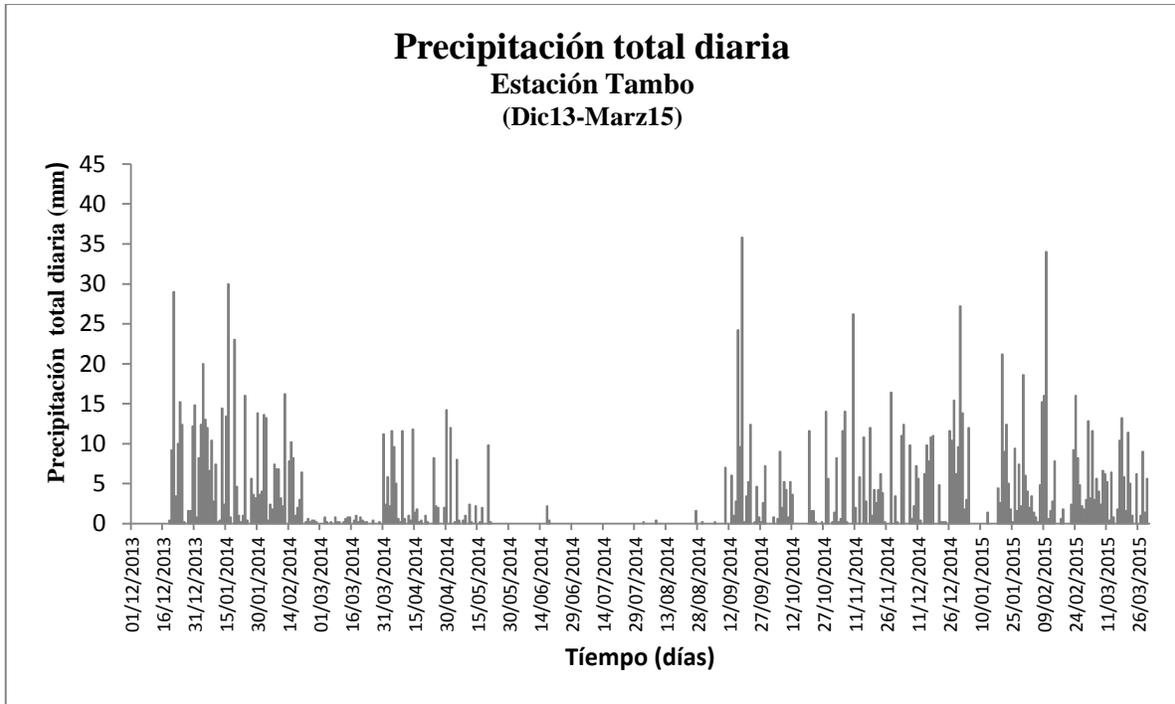
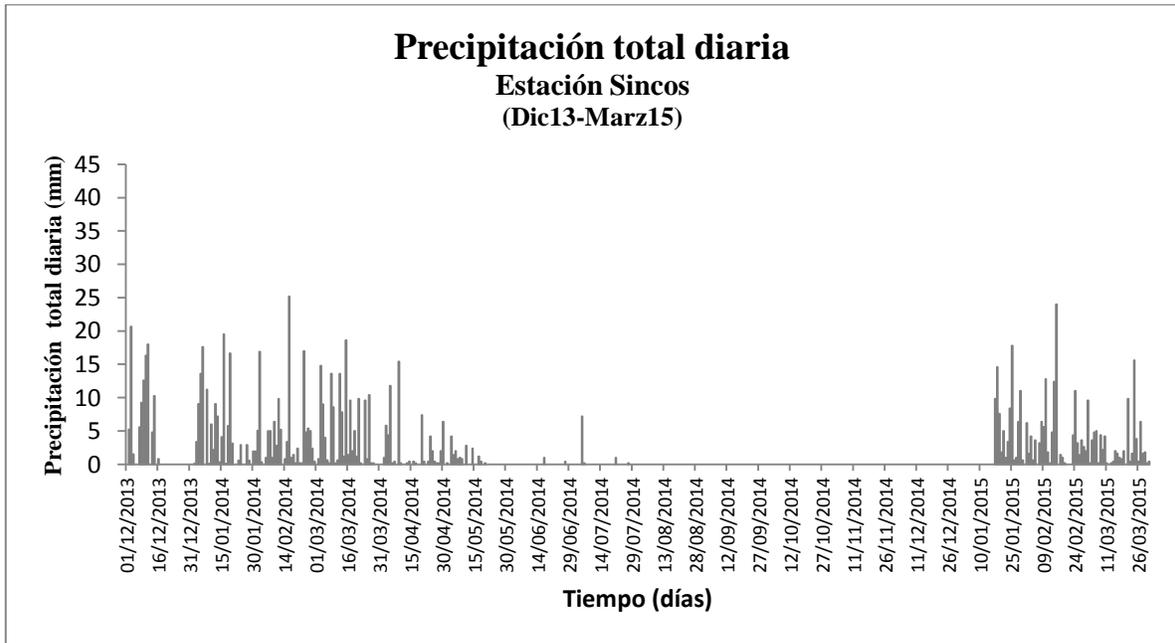


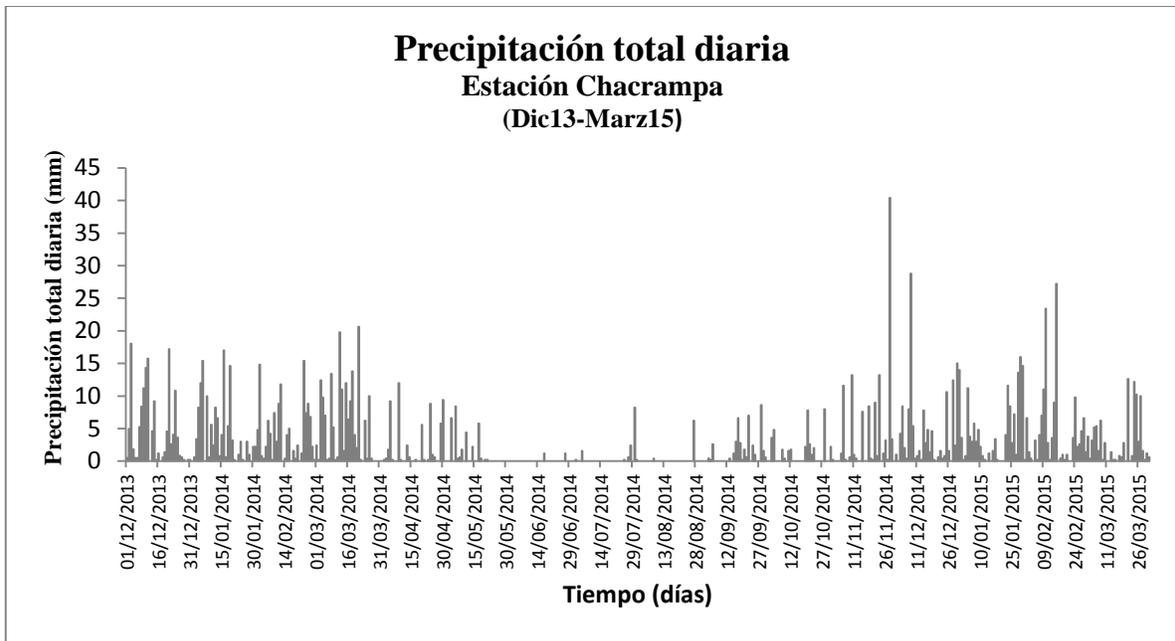
Figura 35: Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Colpar



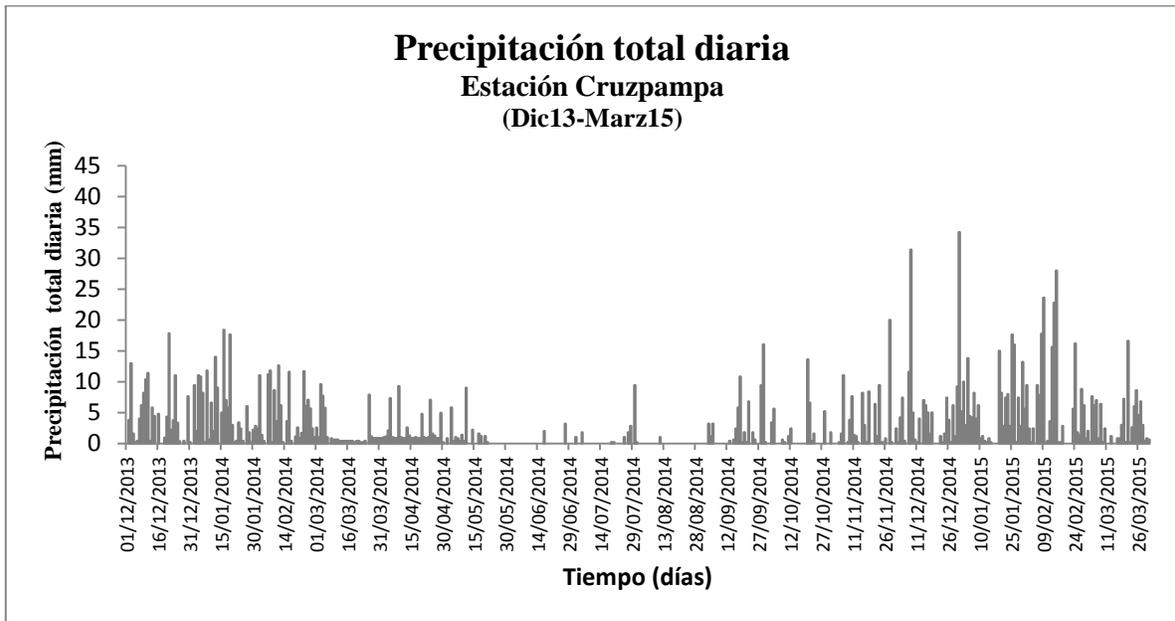
**Figura 36:** Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Tambo



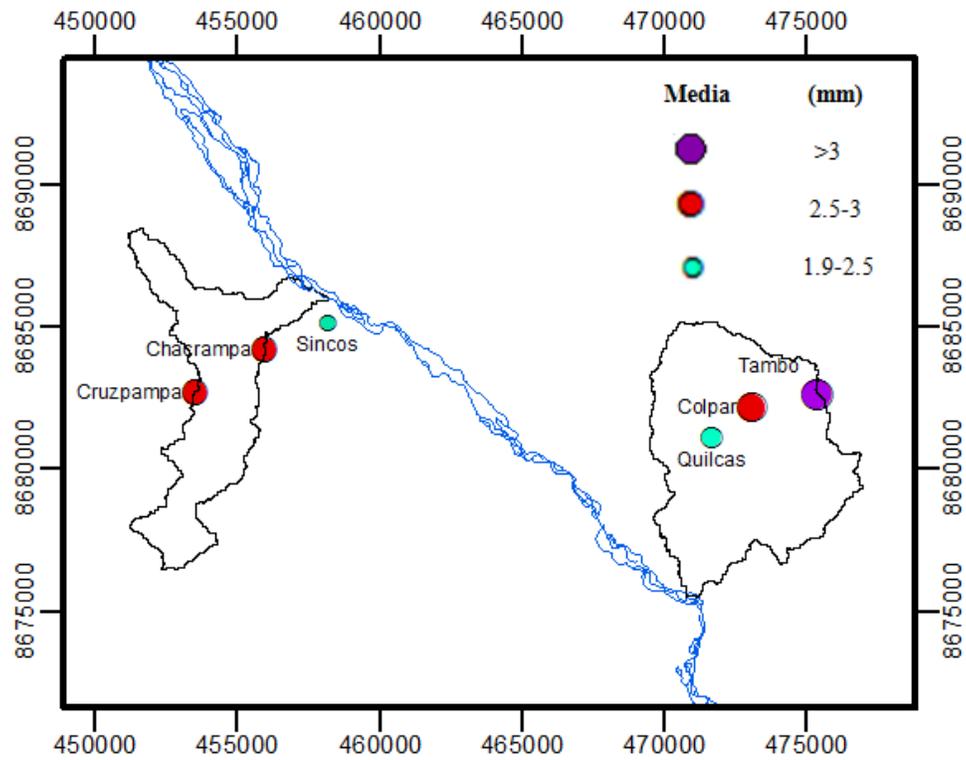
**Figura 37:** Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Sincos



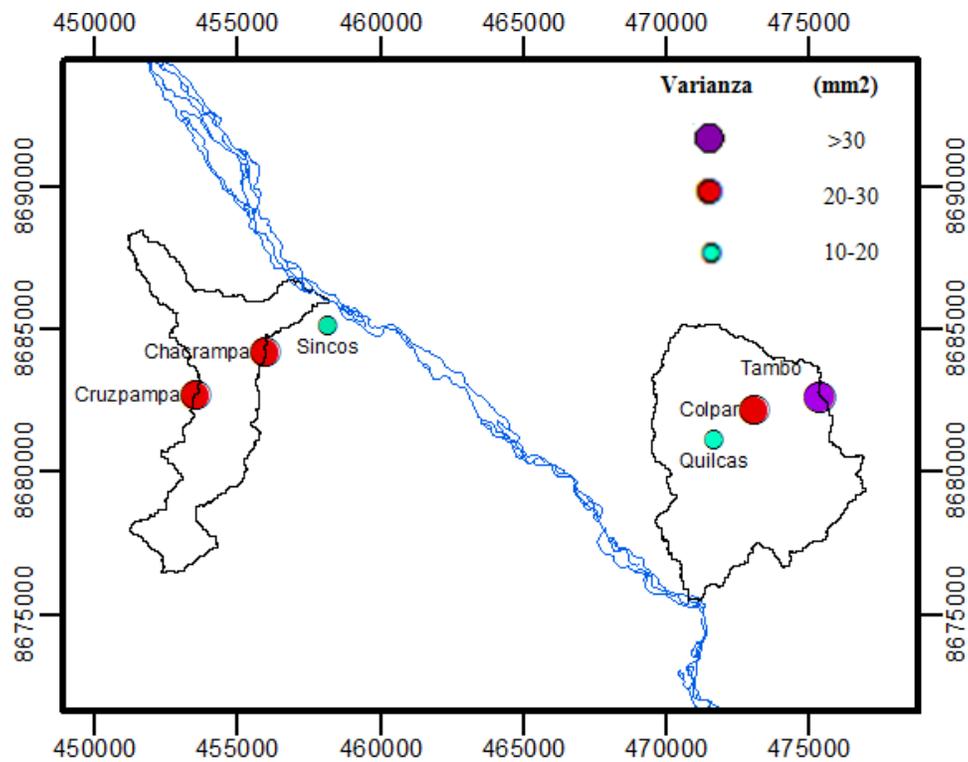
**Figura 38:** Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Chacarumpa



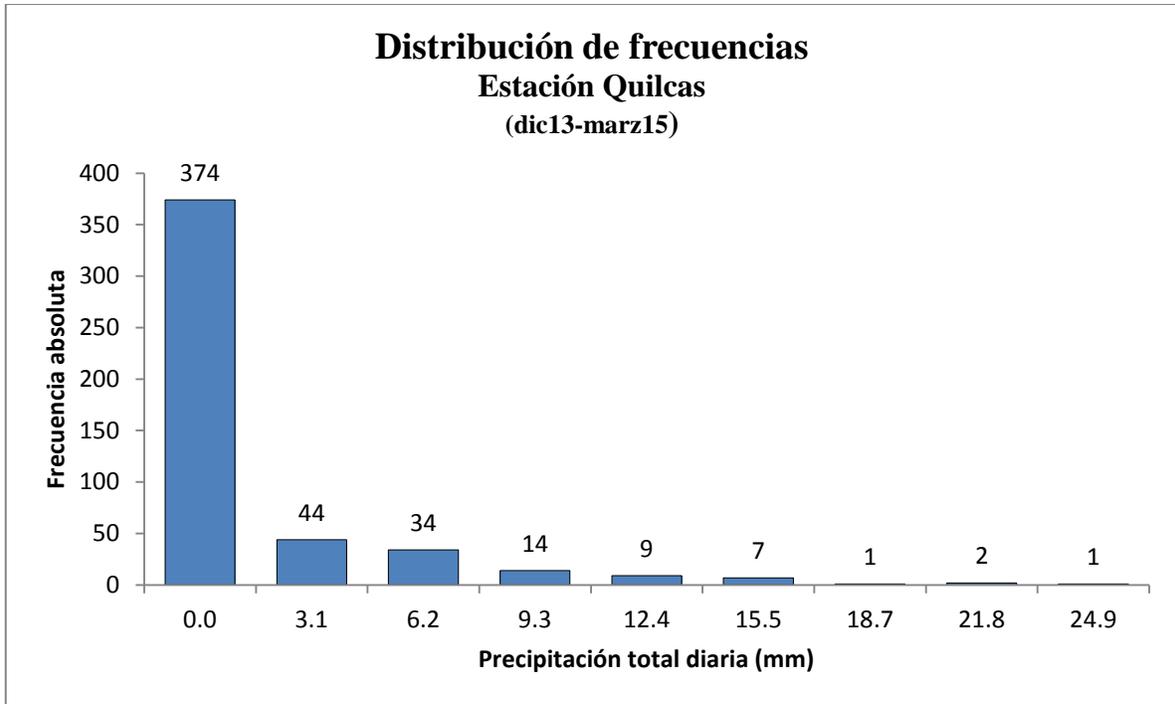
**Figura 39:** Serie de precipitación total diaria (dic13-mar15), estación Cruzpampa



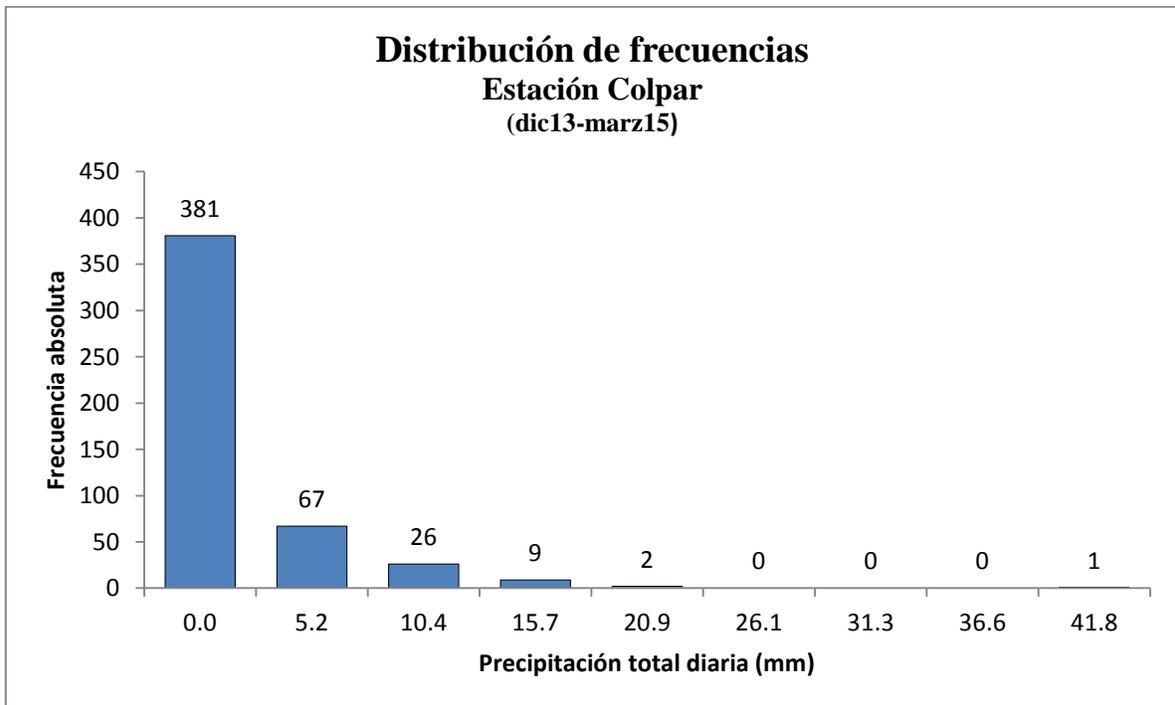
**Figura 40:** Variabilidad espacial de la media (mm) de la precipitación periodo dic 13-mar15



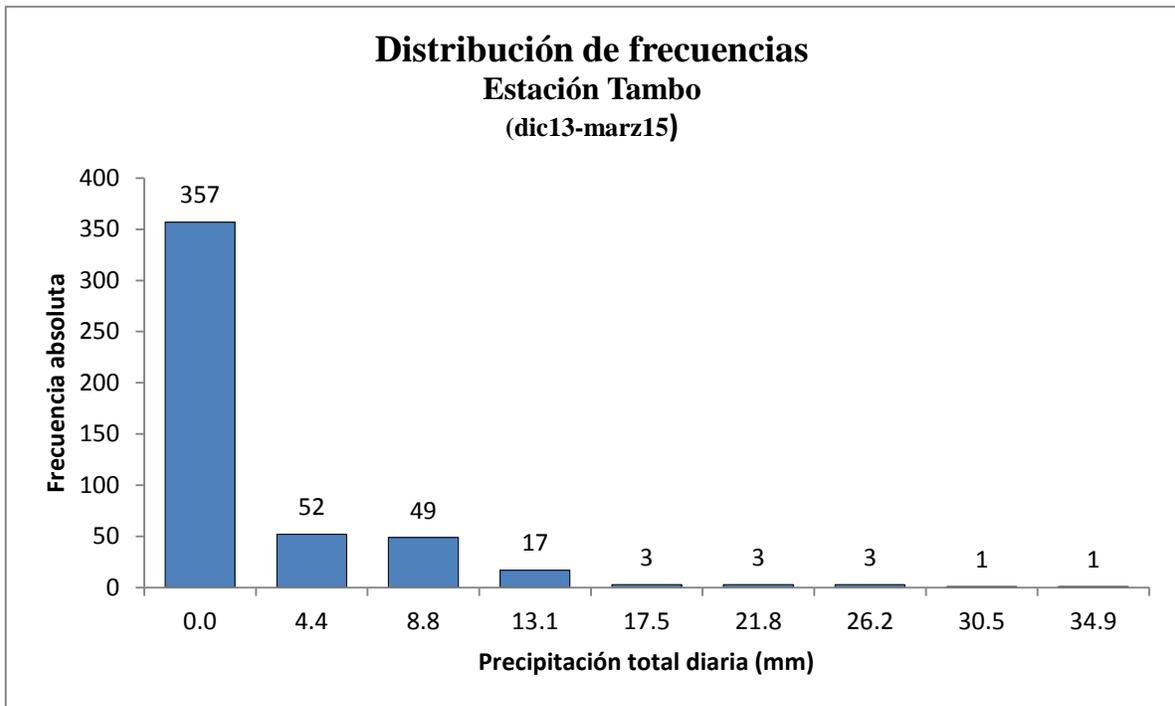
**Figura 41:** Variabilidad espacial de la varianza (mm<sup>2</sup>) de la precipitación periodo dic 13-mar15



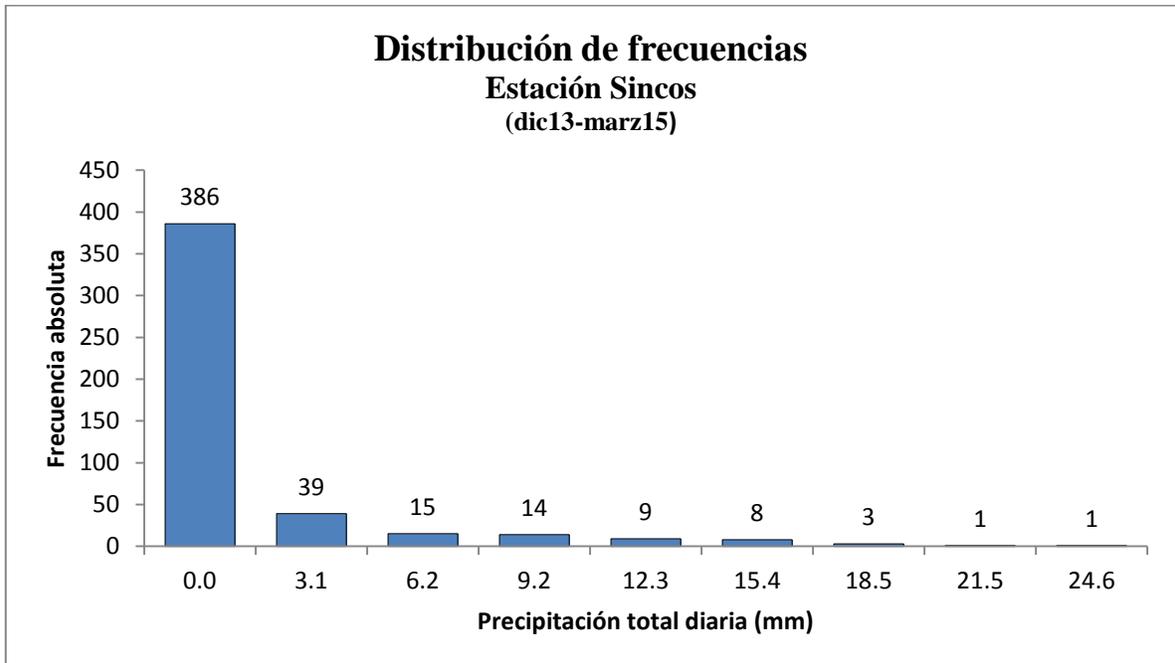
**Figura 42:** Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Quilcas



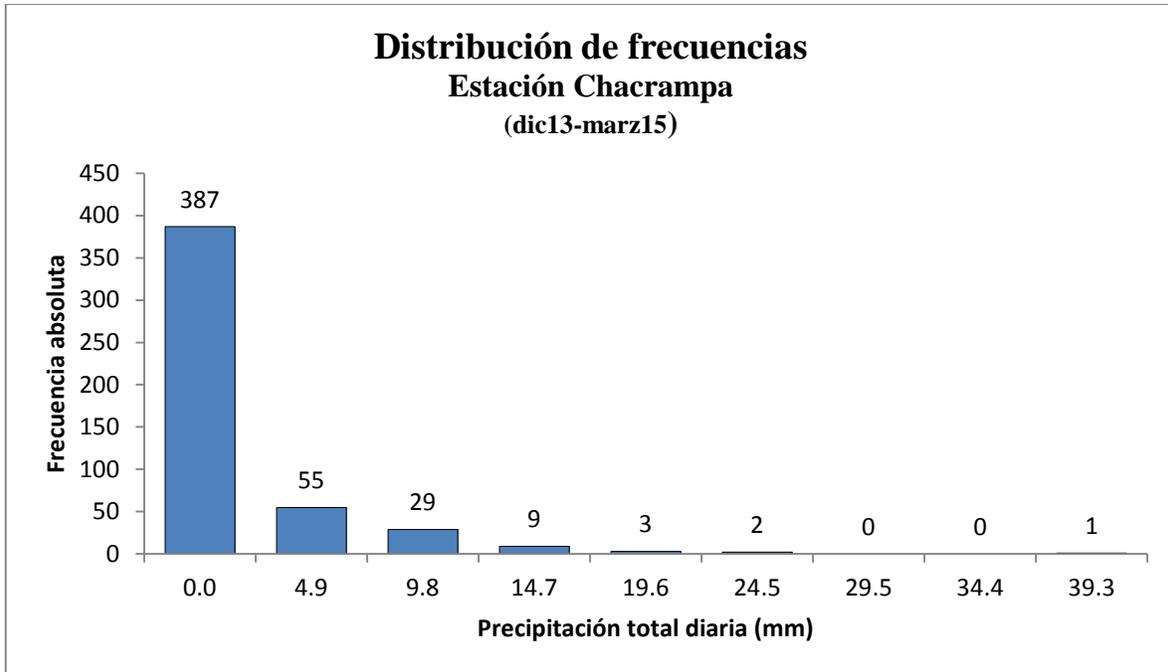
**Figura 43:** Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Colpar



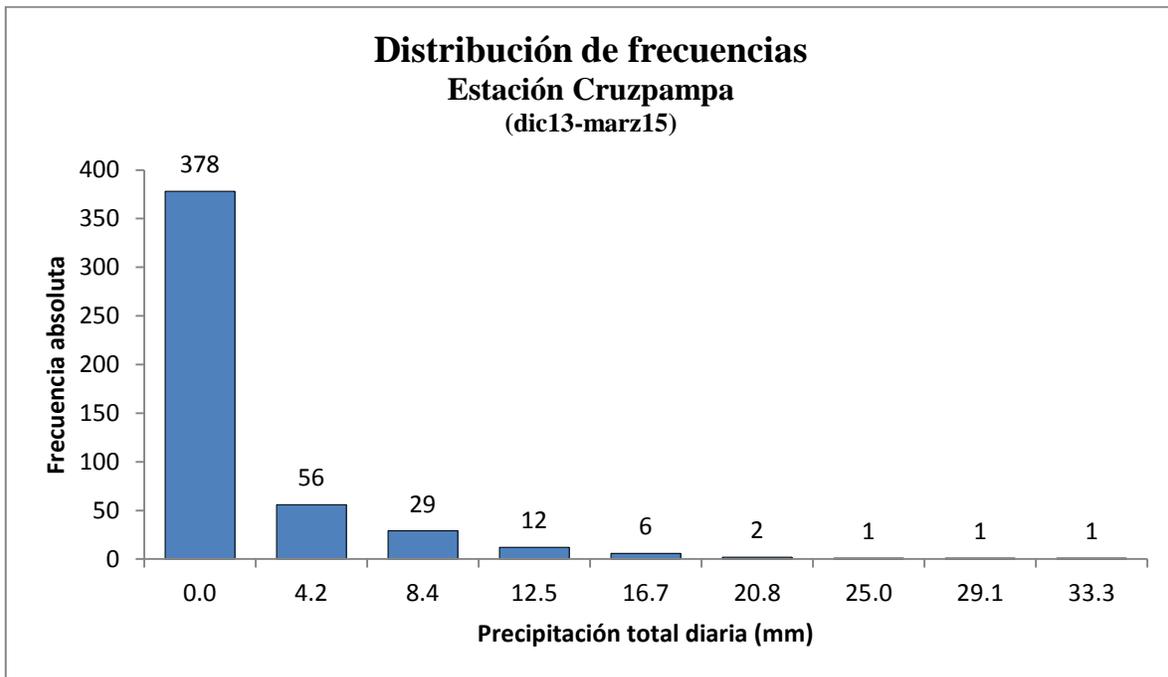
**Figura 44:** Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Tambo



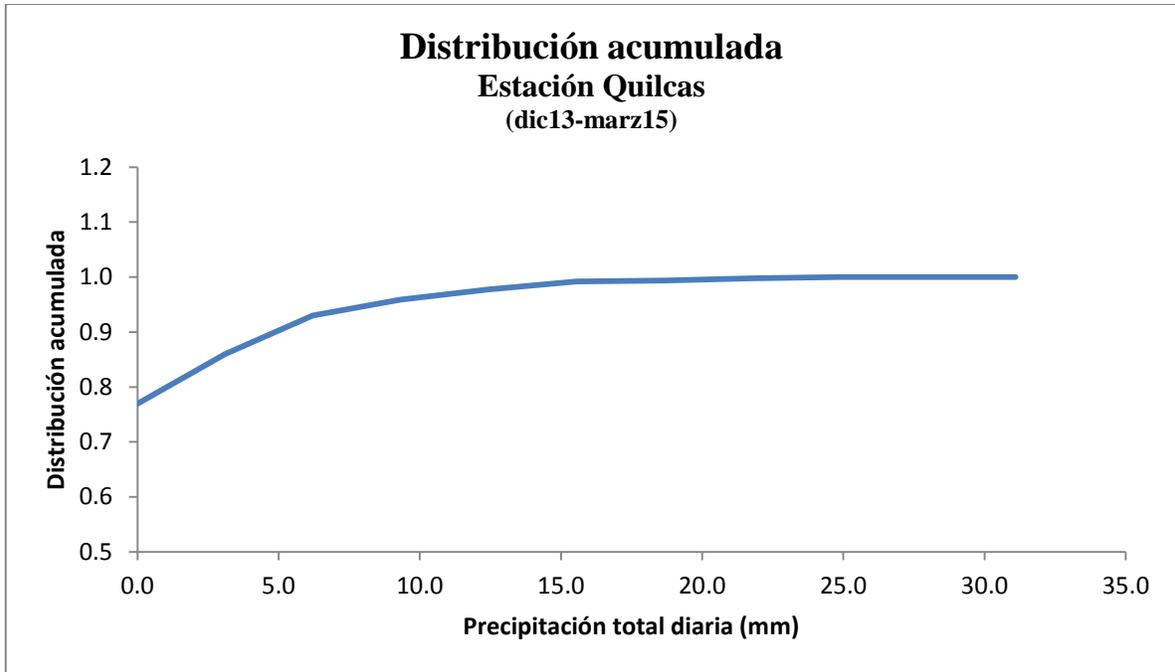
**Figura 45:** Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Sincos



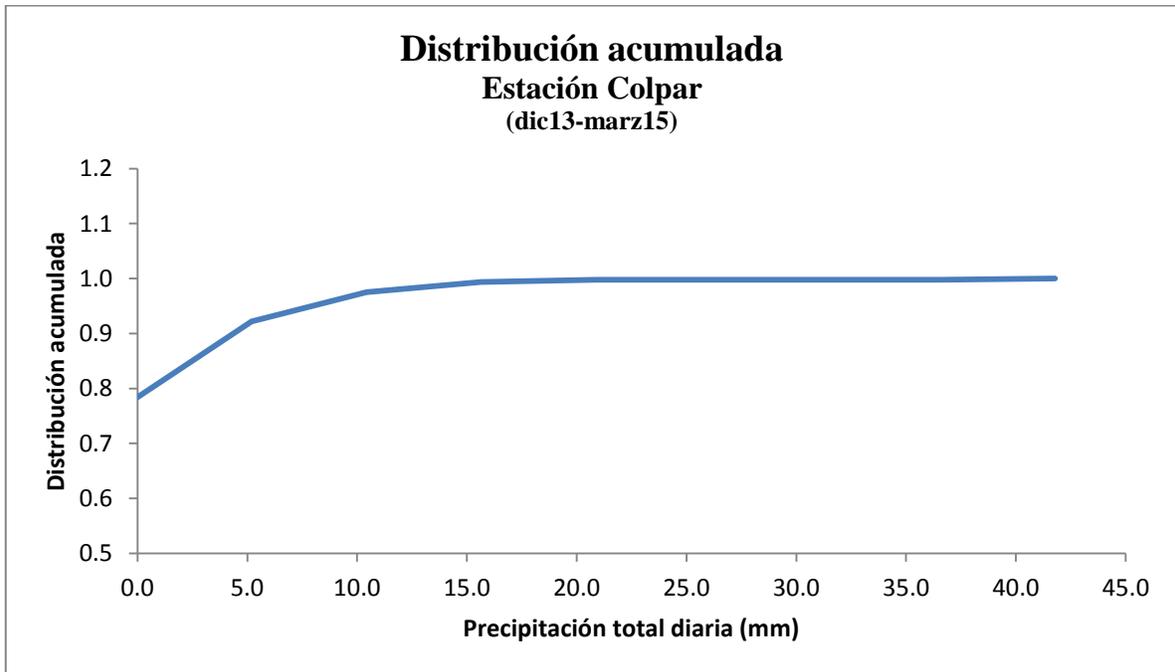
**Figura 46:** Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Chacrampa



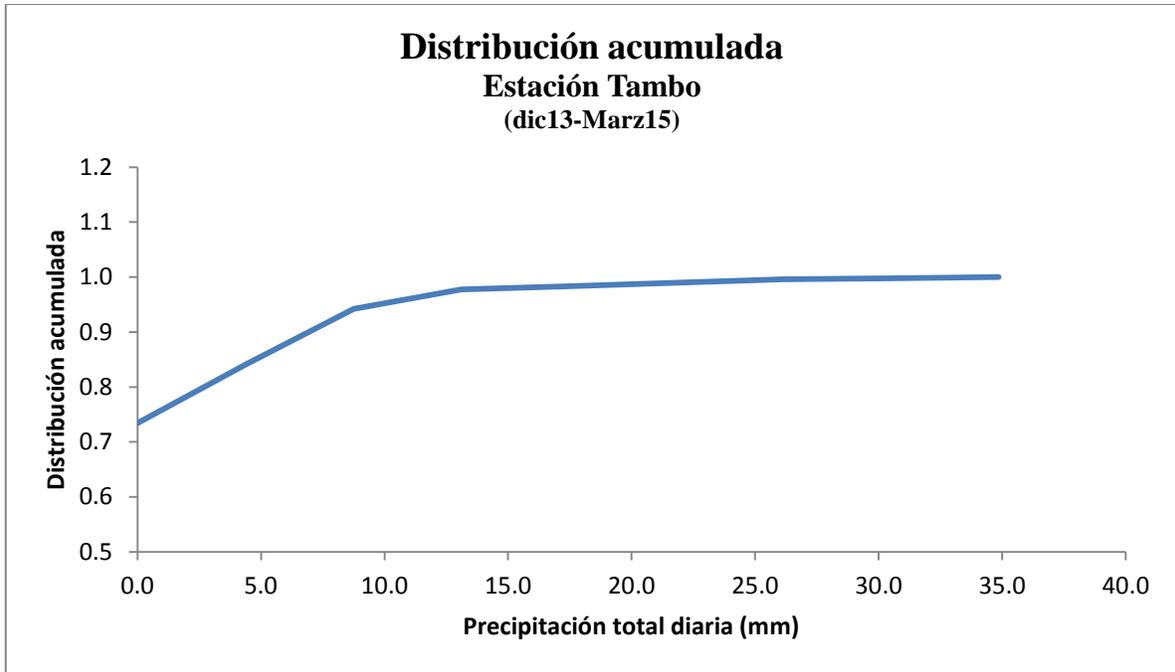
**Figura 47:** Histograma de la precipitación total diaria (dic13-marz15), estación Cruzpampa



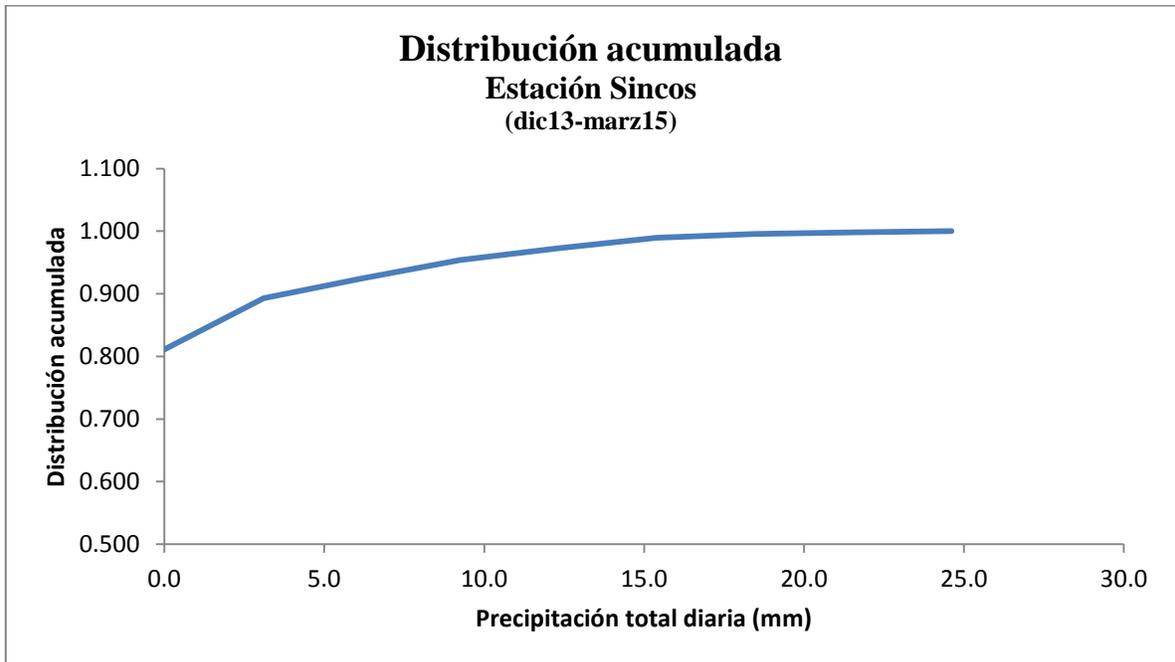
**Figura 48:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Quilcas



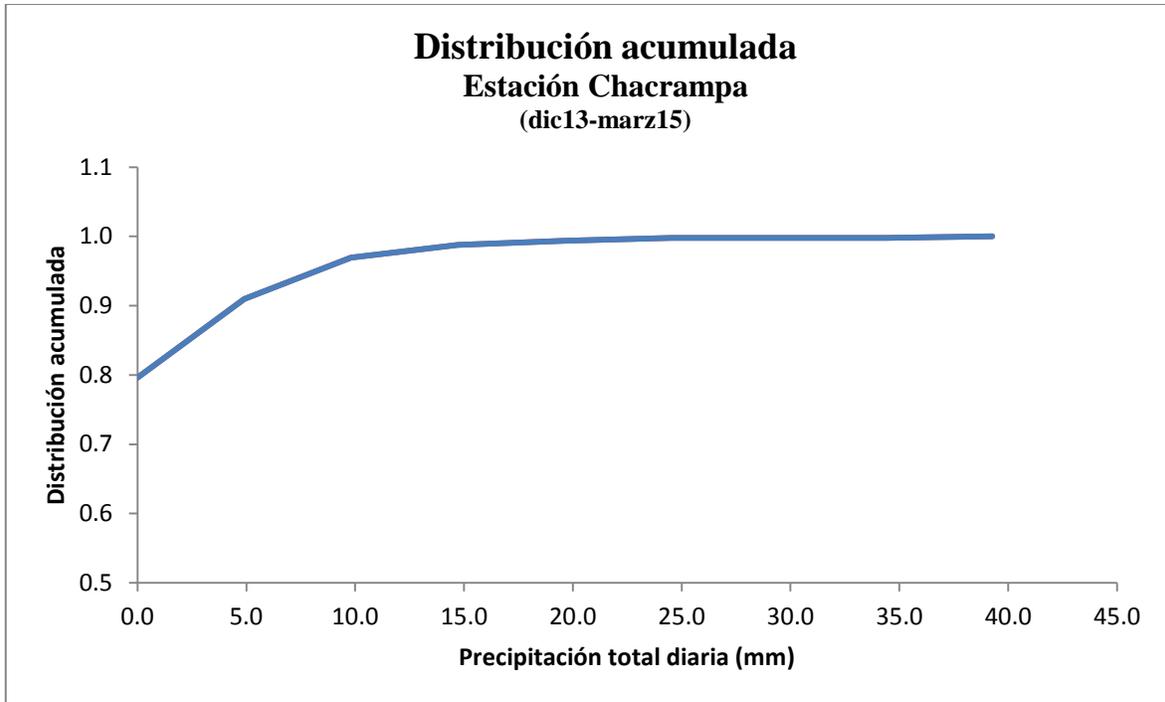
**Figura 49:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Colpar



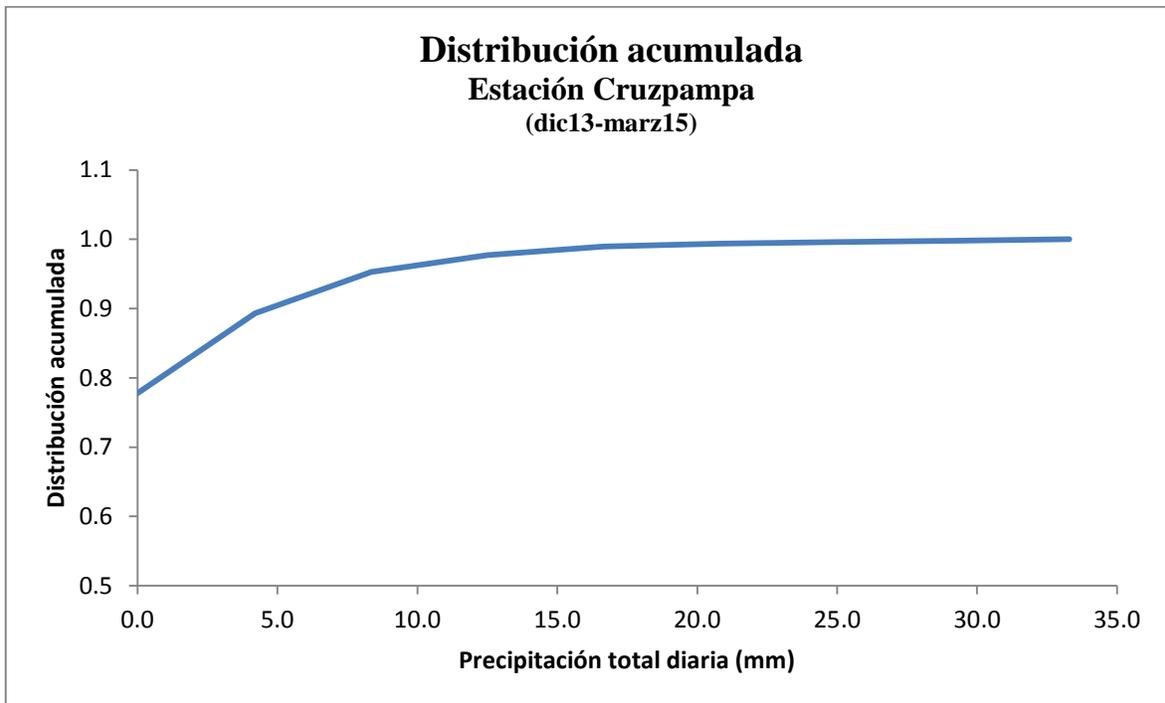
**Figura 50:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Tambo



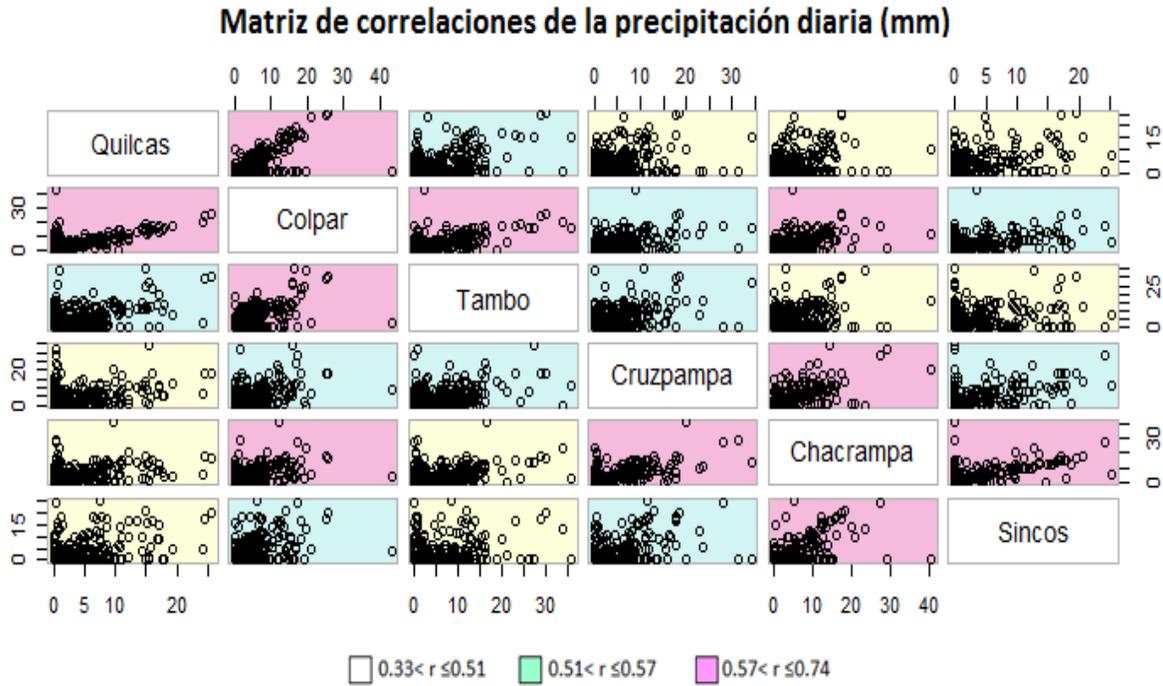
**Figura 51:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Sincos



**Figura 52:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Chacrampa



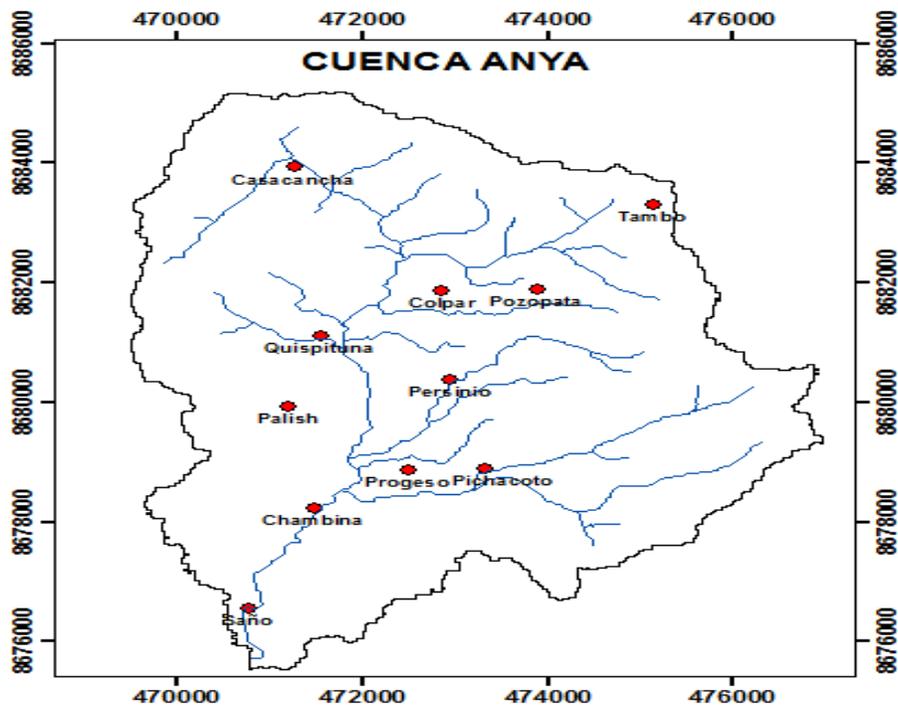
**Figura 53:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria, estación Cruzpampa



**Figura 54:** Matriz de correlaciones de la precipitación total diaria, periodo dic13-mar15

### Anexo 2.2: Humedad del suelo

#### a) Mapas de ubicación de los puntos de la humedad del suelo



**Figura 55:** Mapa de ubicación de los puntos de humedad de la cuenca Anya



Figura 56: Mapa de ubicación de los puntos de humedad de la cuenca Mchique

b) Mapas de humedad del suelo de la cuenca Anya

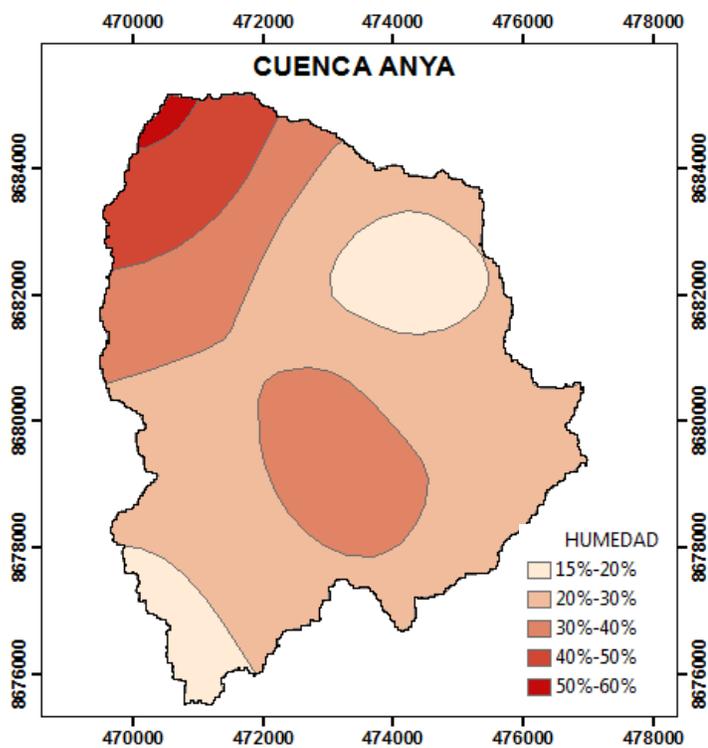
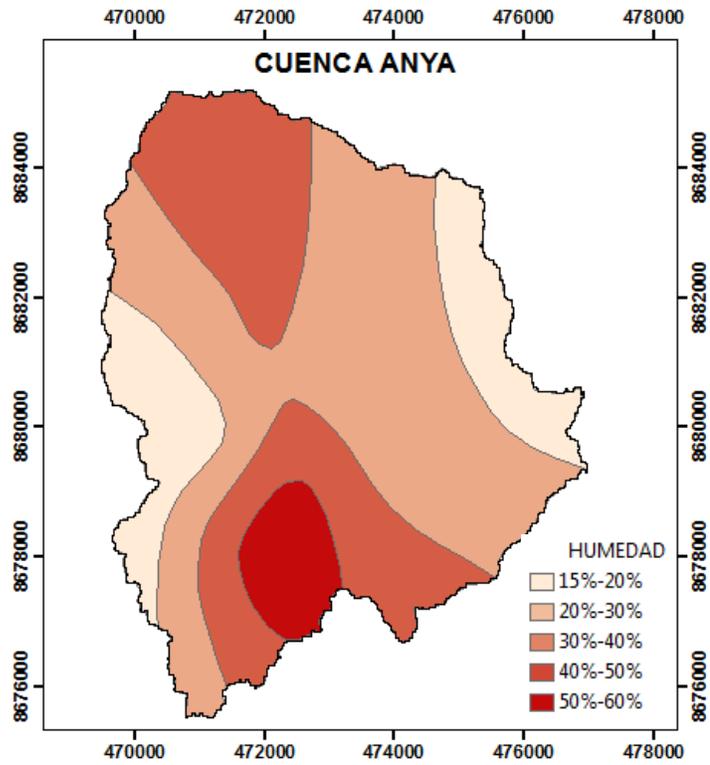
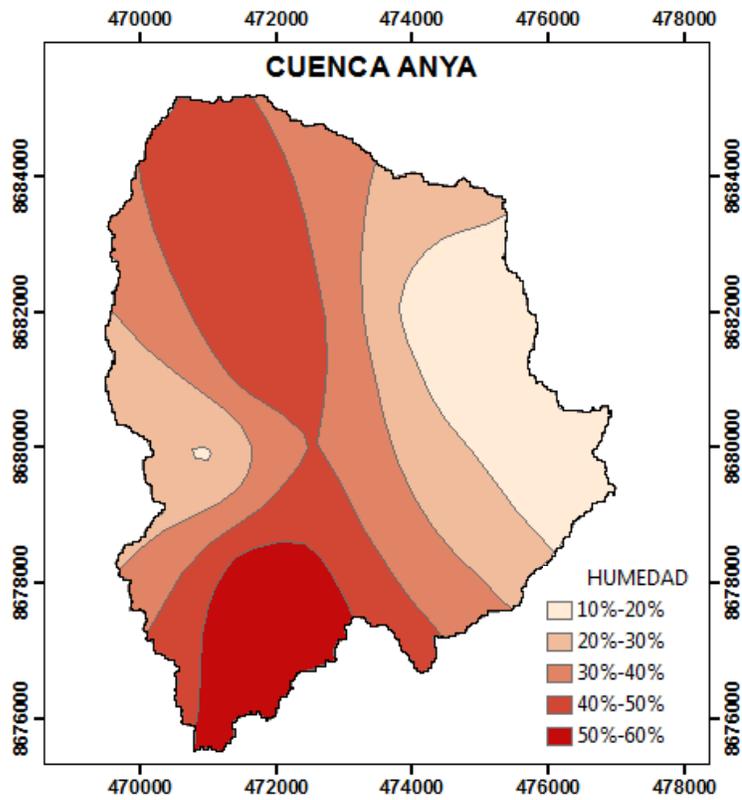


Figura 57: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Diciembre 2013



**Figura 58:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Enero 2014



**Figura 59:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Febrero 2014

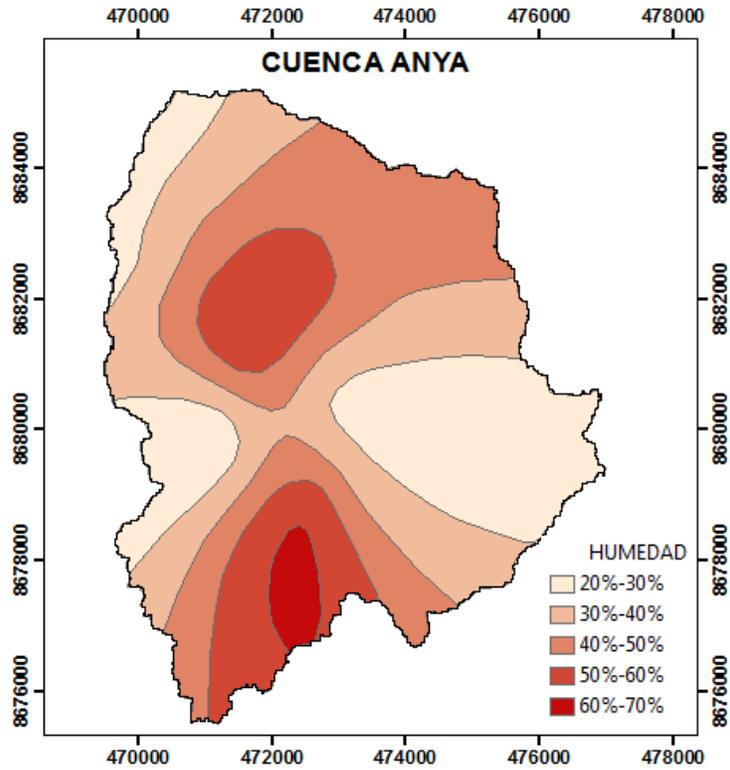


Figura 60: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Marzo 2014

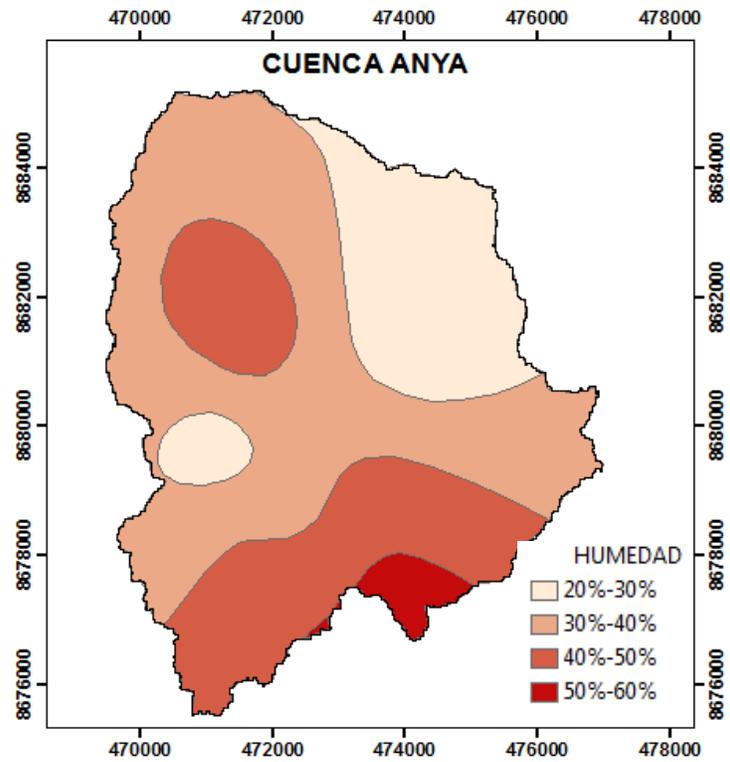
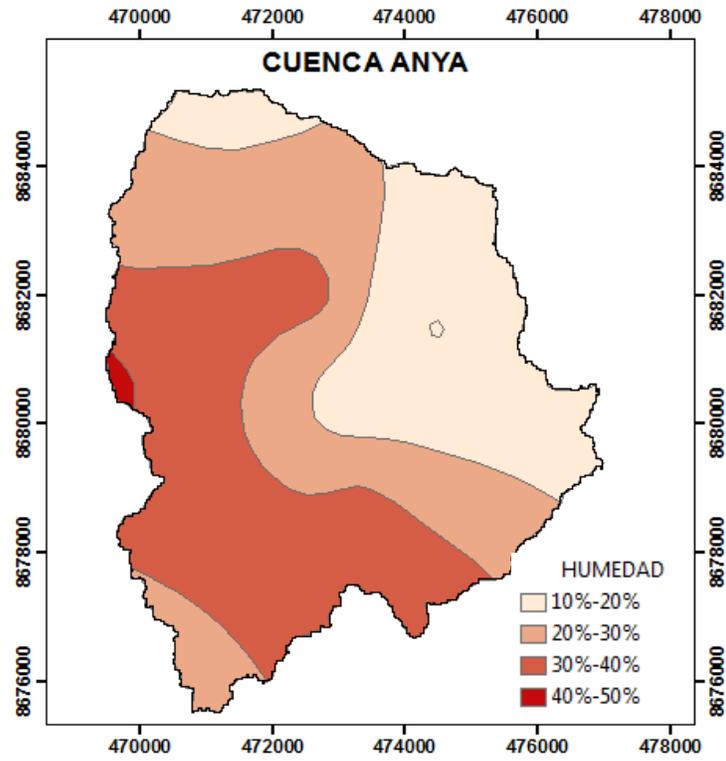
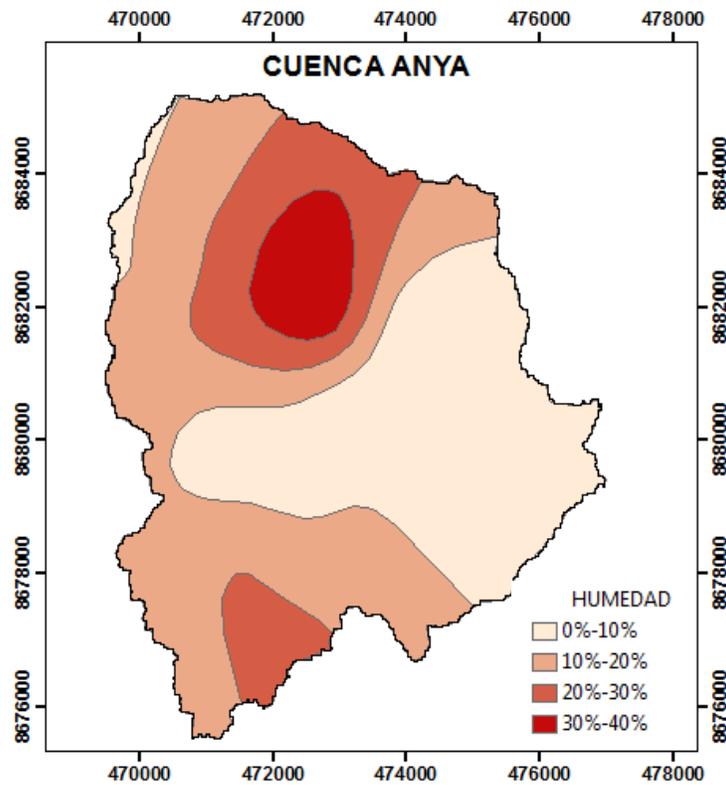


Figura 61: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Abril 2014



**Figura 62:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Mayo 2014



**Figura 63:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Junio 2014

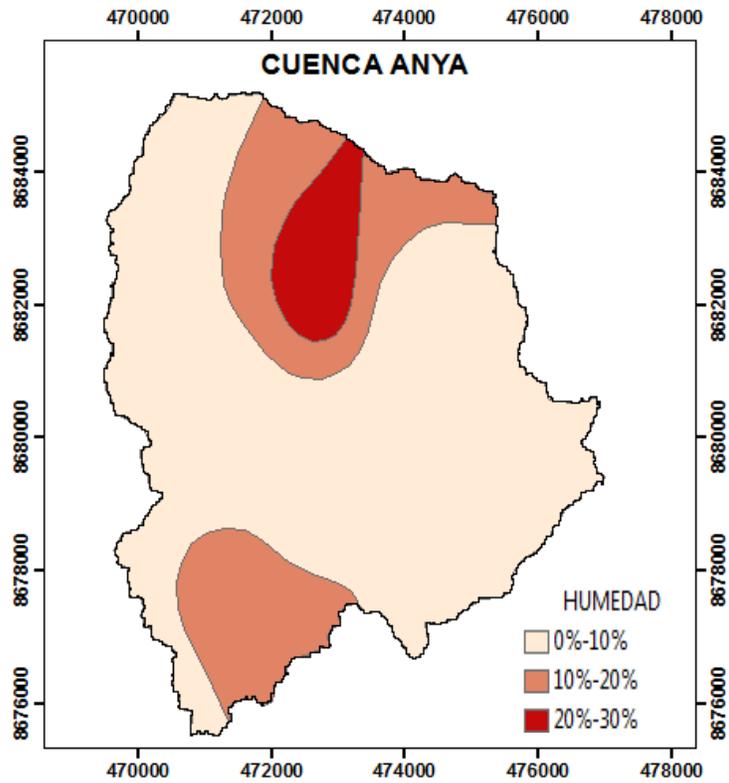


Figura 64: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Julio 2014

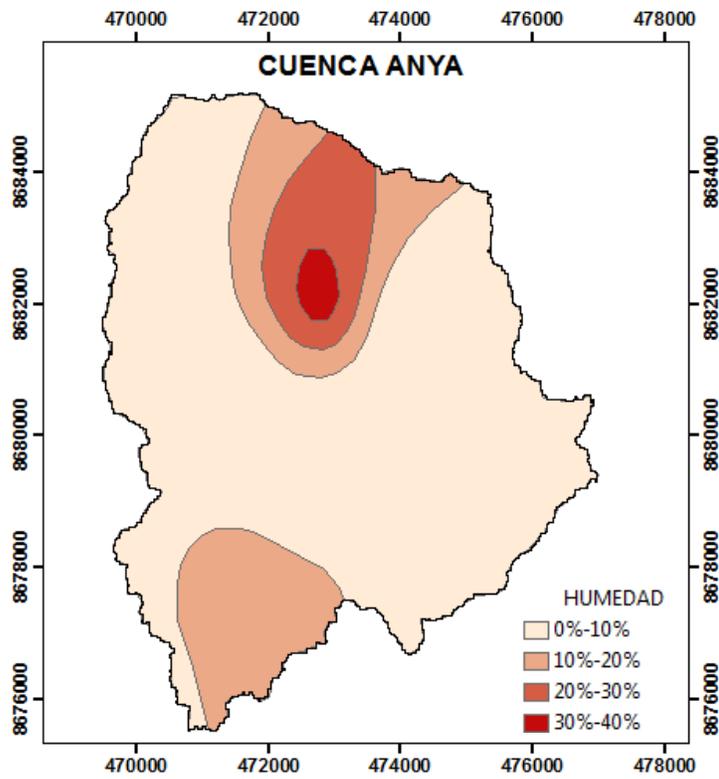
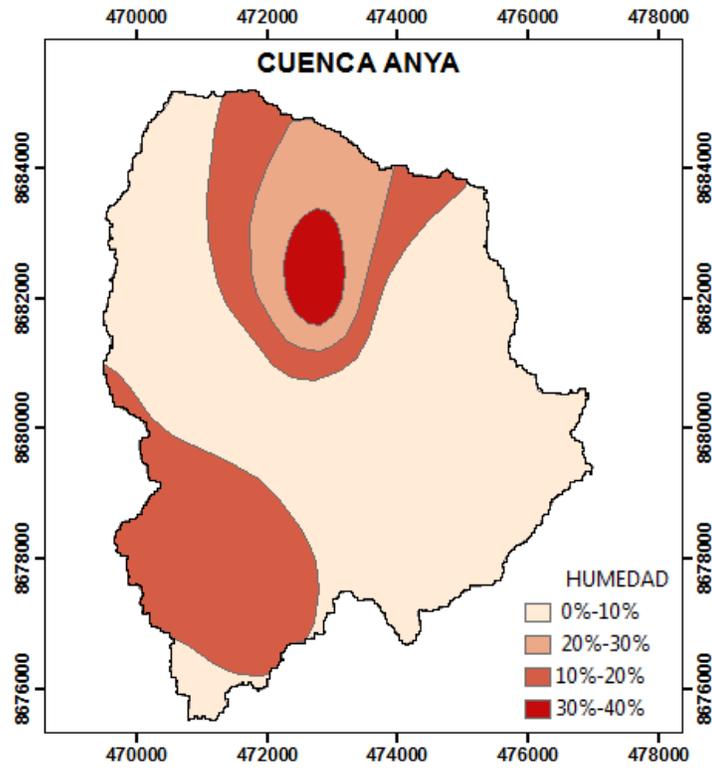
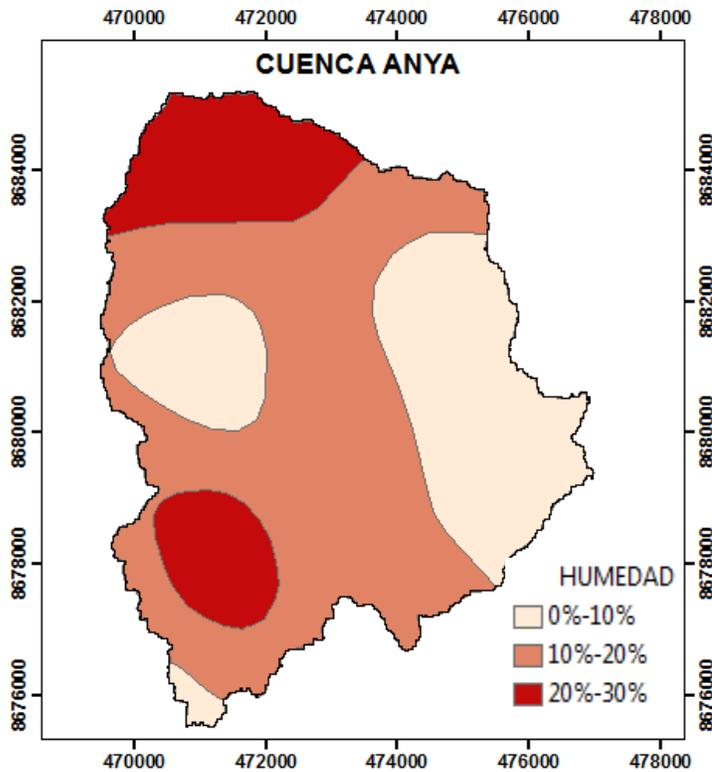


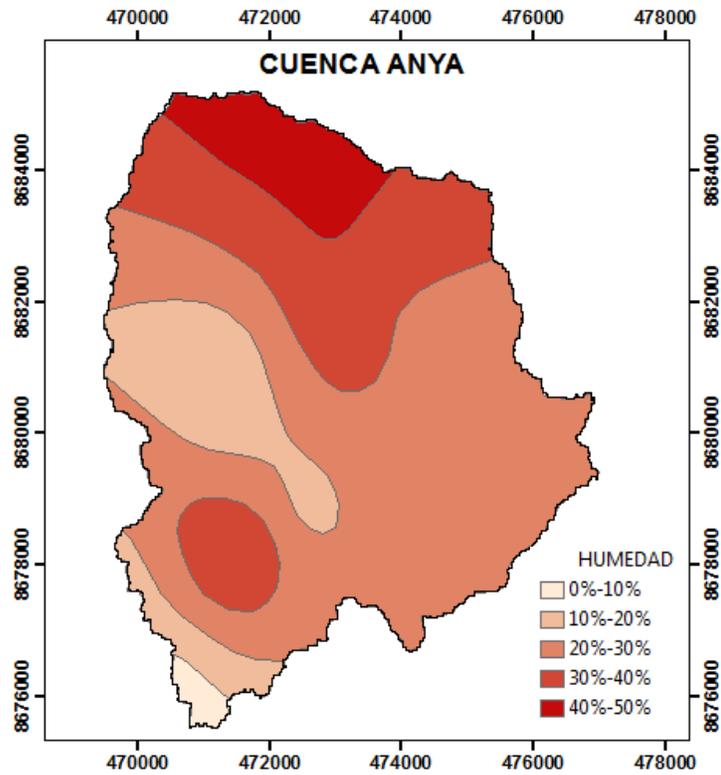
Figura 65: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Agosto 2014



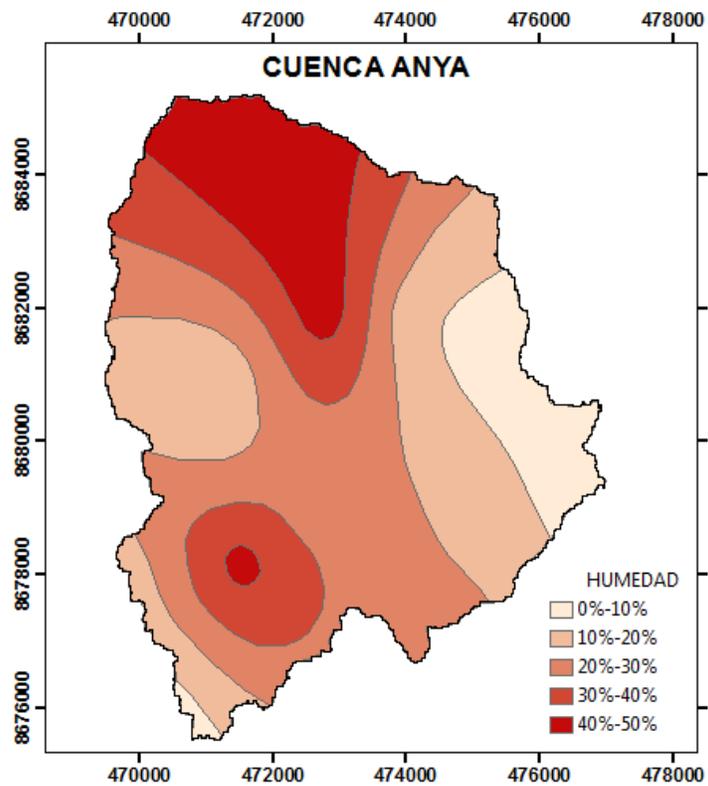
**Figura 66:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Setiembre 2014



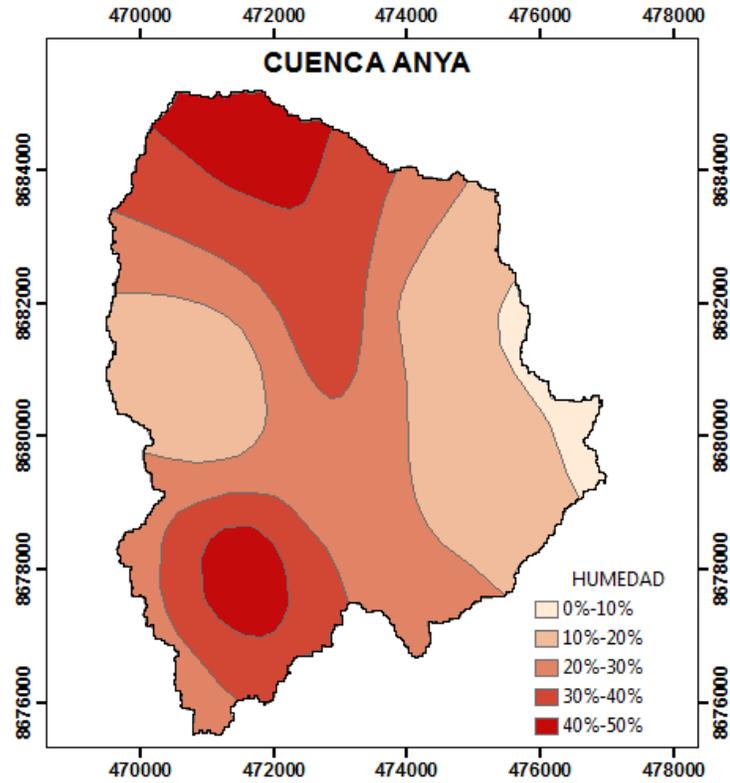
**Figura 67:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Octubre 2014



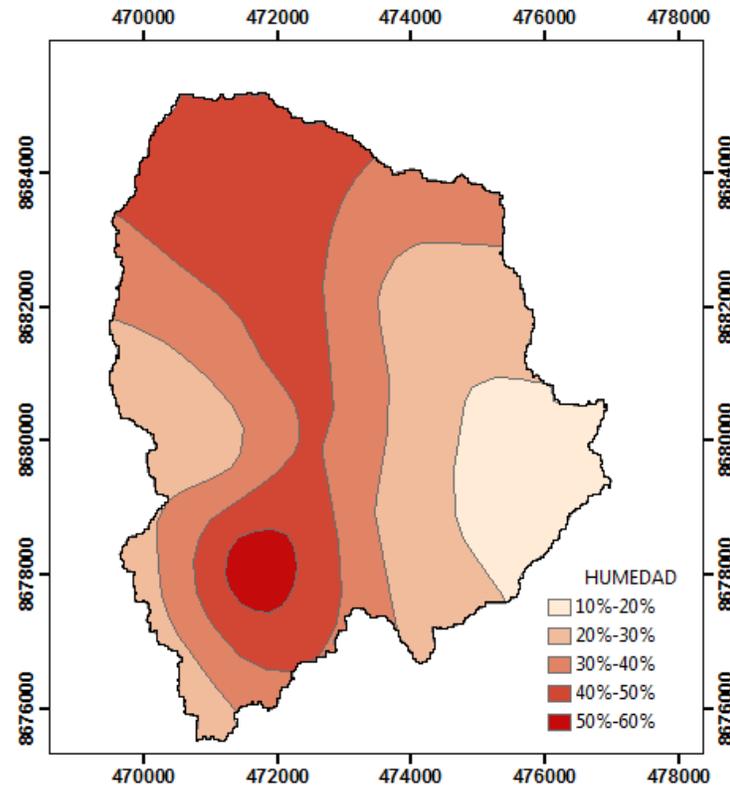
**Figura 68:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Noviembre 2014



**Figura 69:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Diciembre 2014



**Figura 70:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Enero 2015



**Figura 71:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Febrero 2015

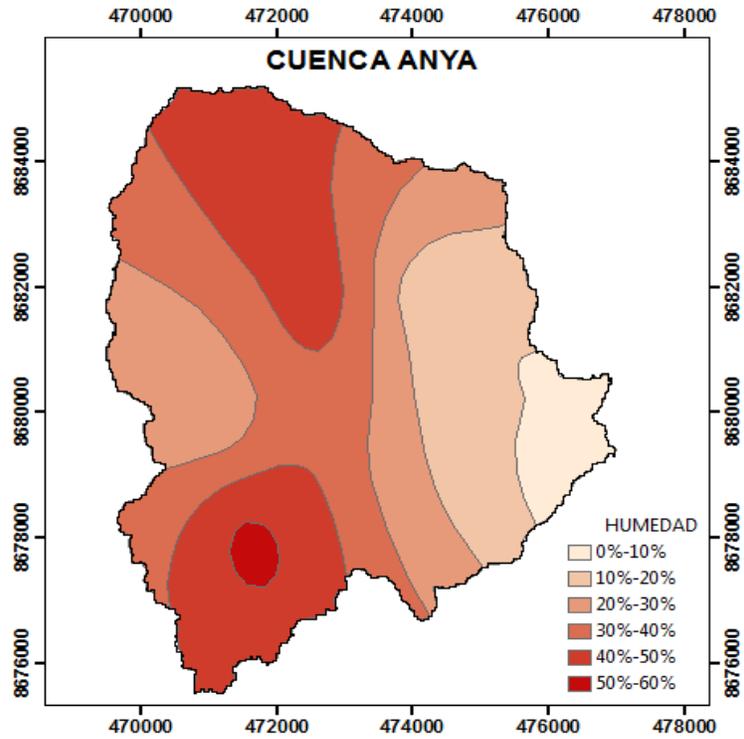


Figura 72: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Anya, Marzo 2015

C) Mapas de la humedad del suelo de la cuenca Mchique

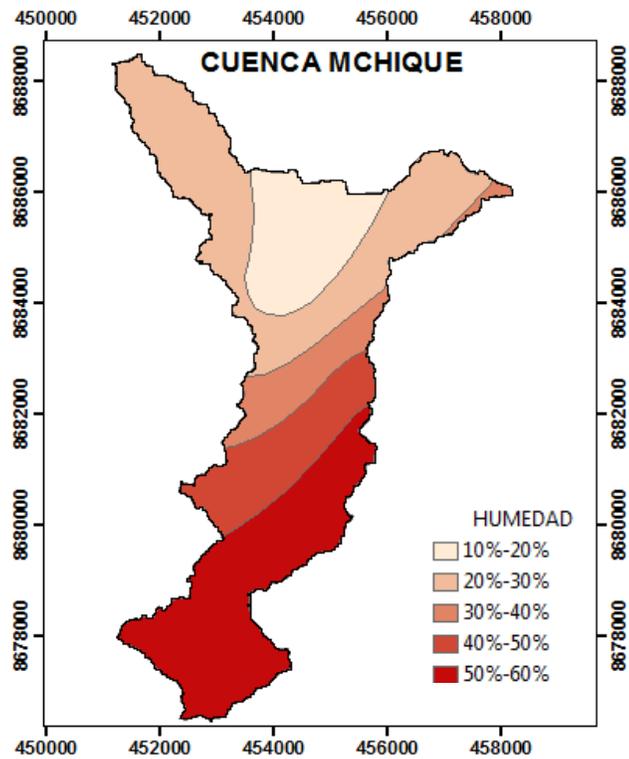
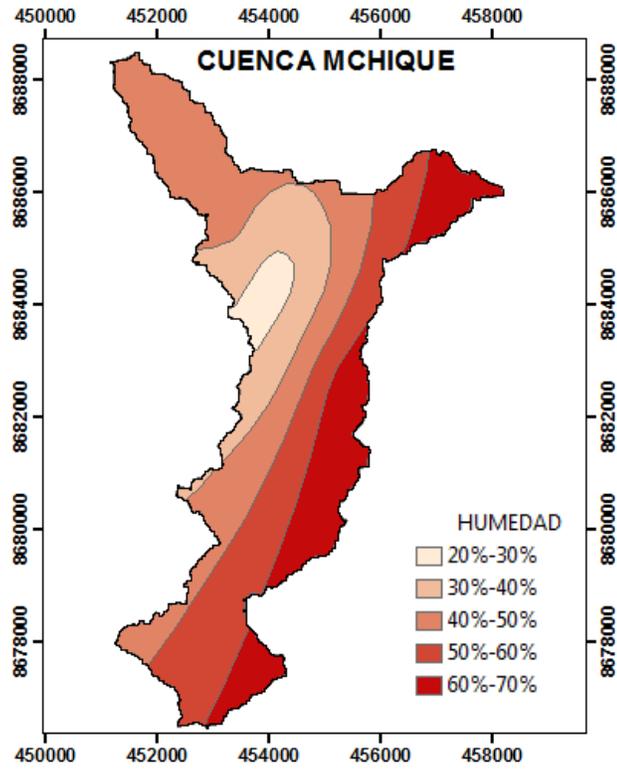
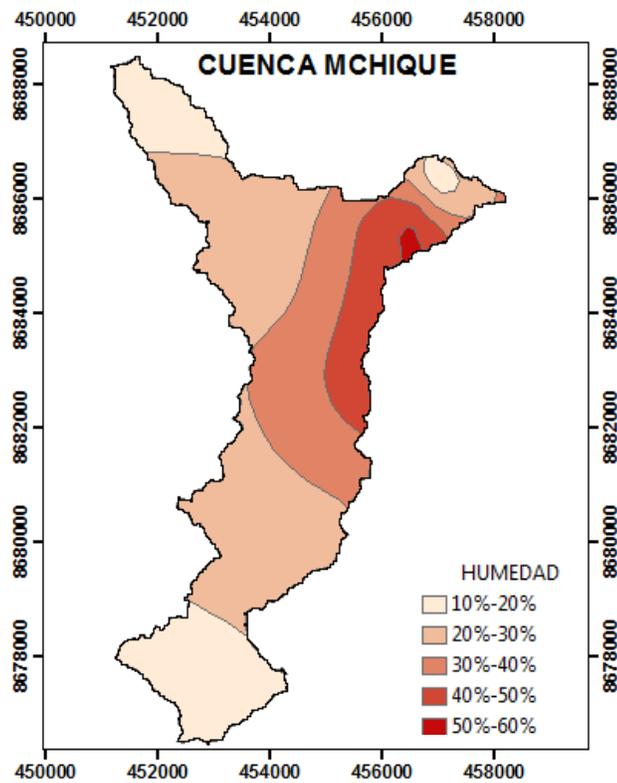


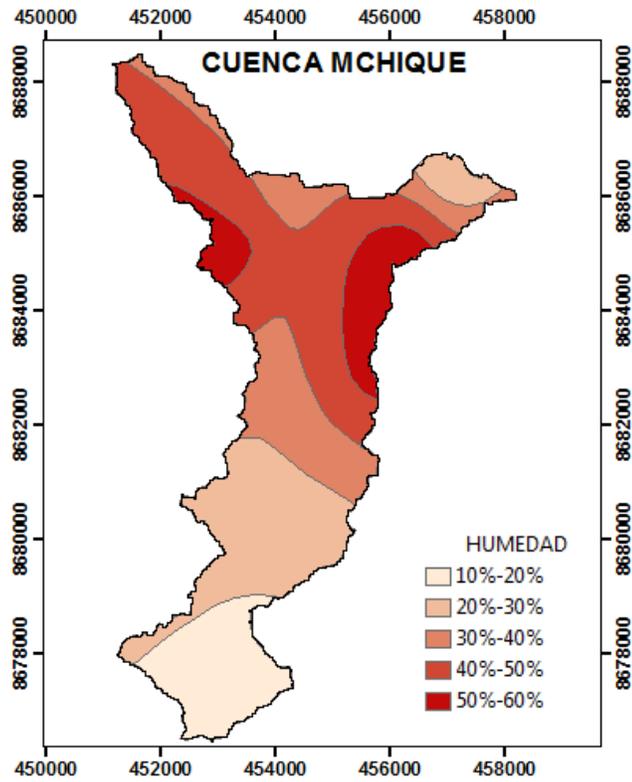
Figura 73: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Diciembre 2013



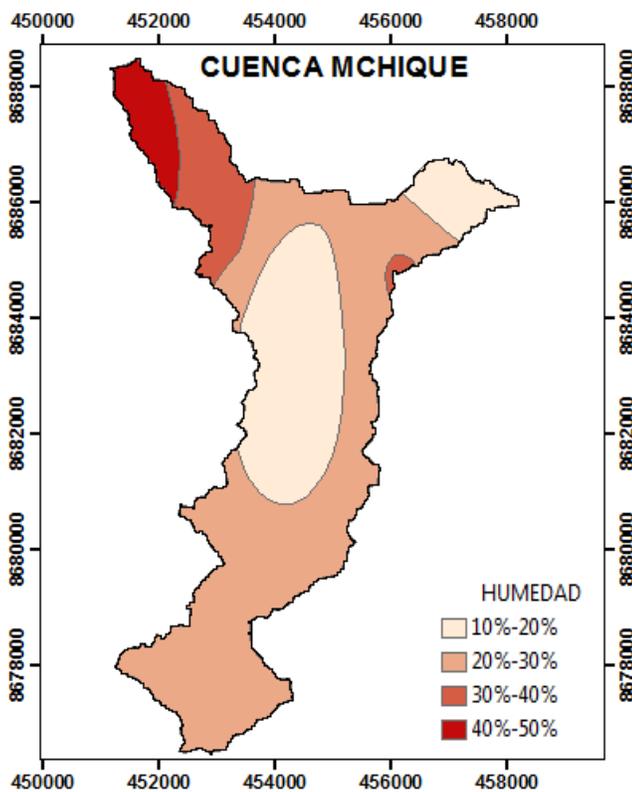
**Figura 74:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Enero 2014



**Figura 75:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Febrero 2014



**Figura 76:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Marzo 2014



**Figura 77:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Abril 2014

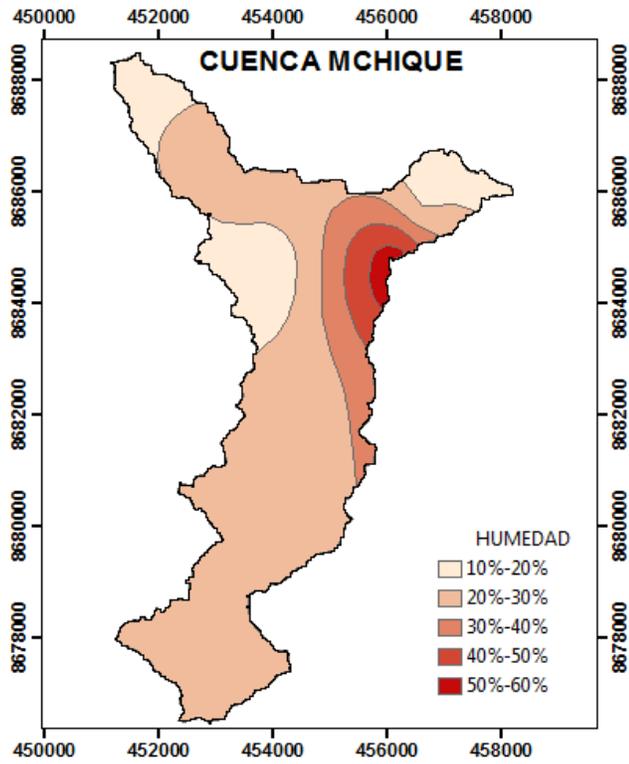


Figura 78: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Mayo 2014

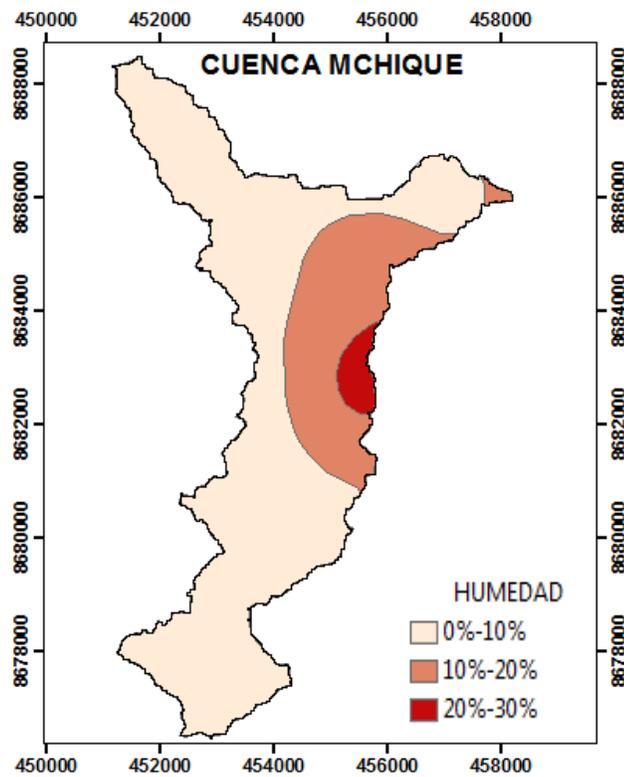
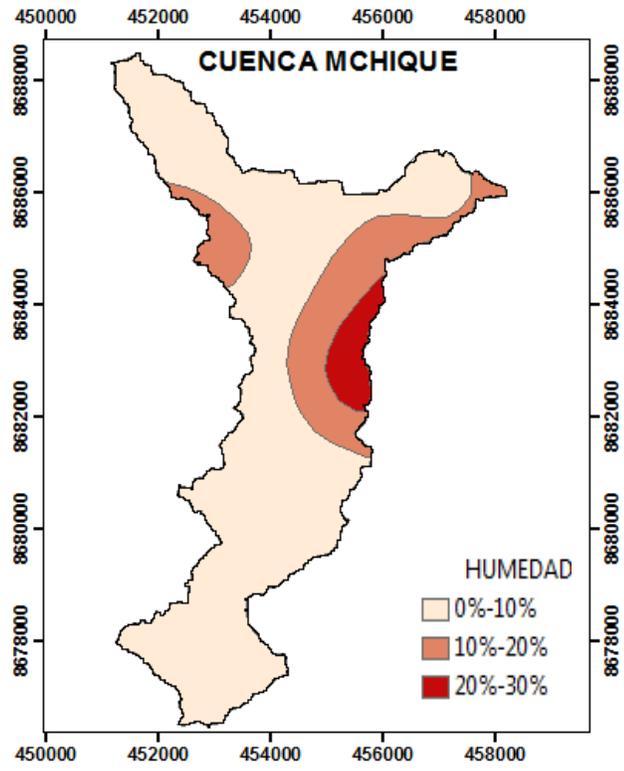
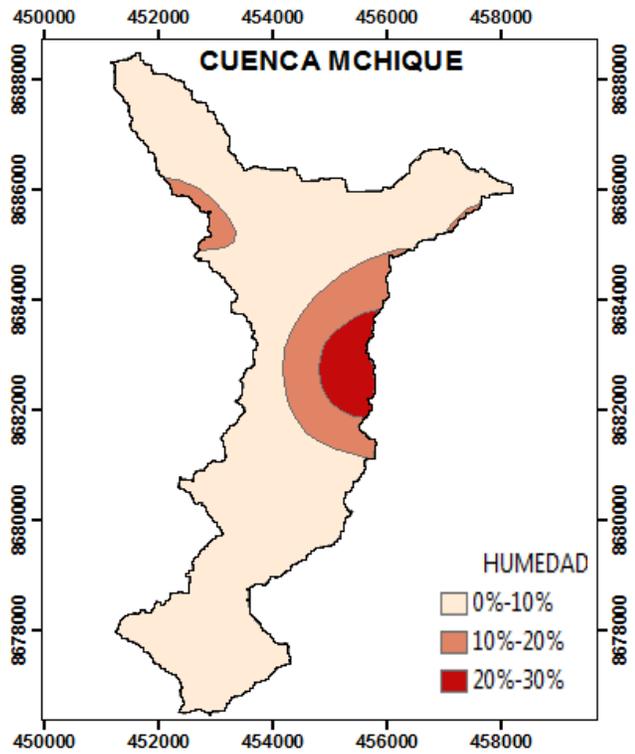


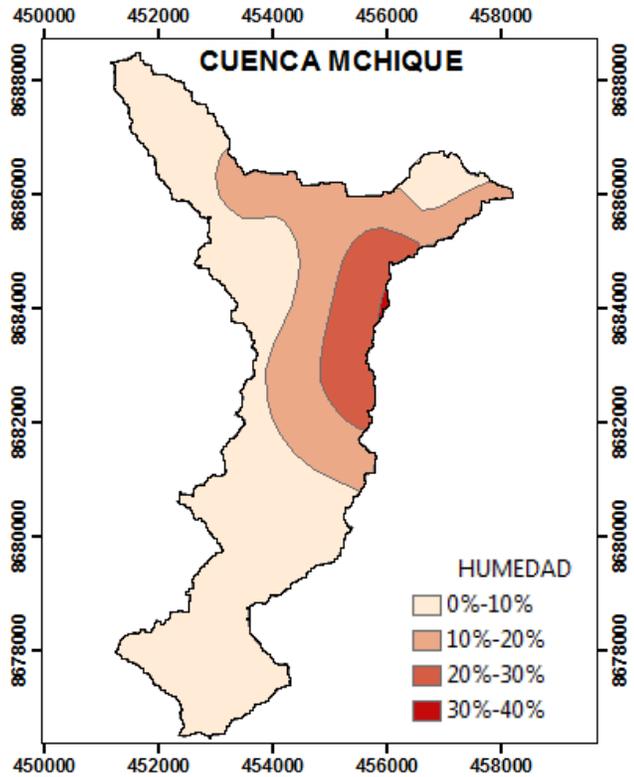
Figura 79: Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Junio 2014



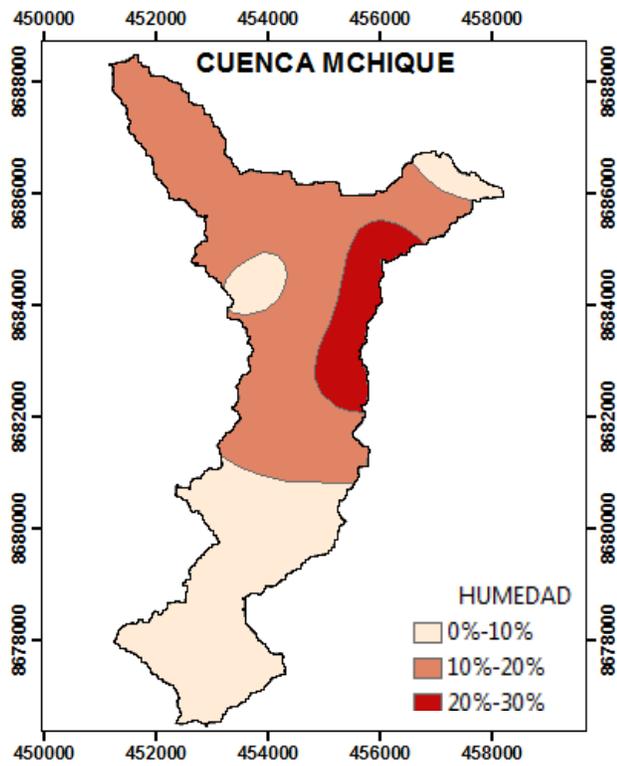
**Figura 80:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Julio 2014



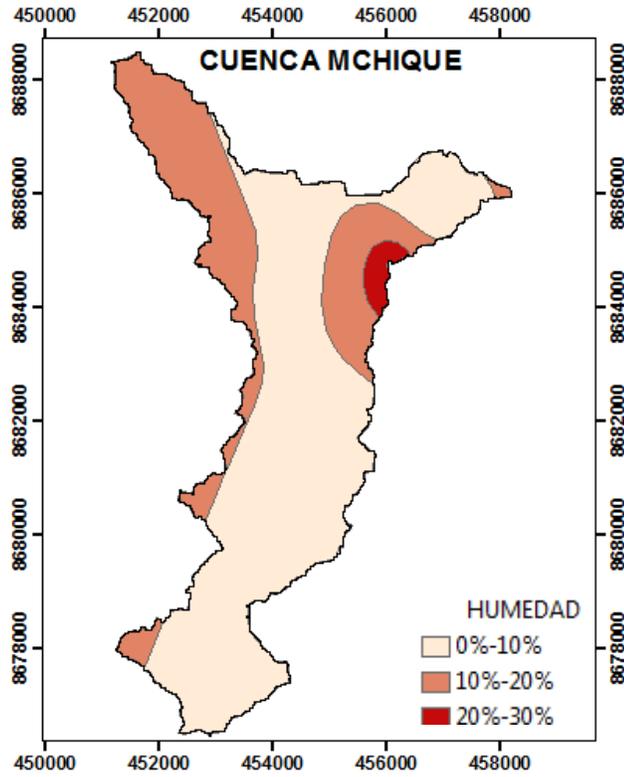
**Figura 81:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Agosto 2014



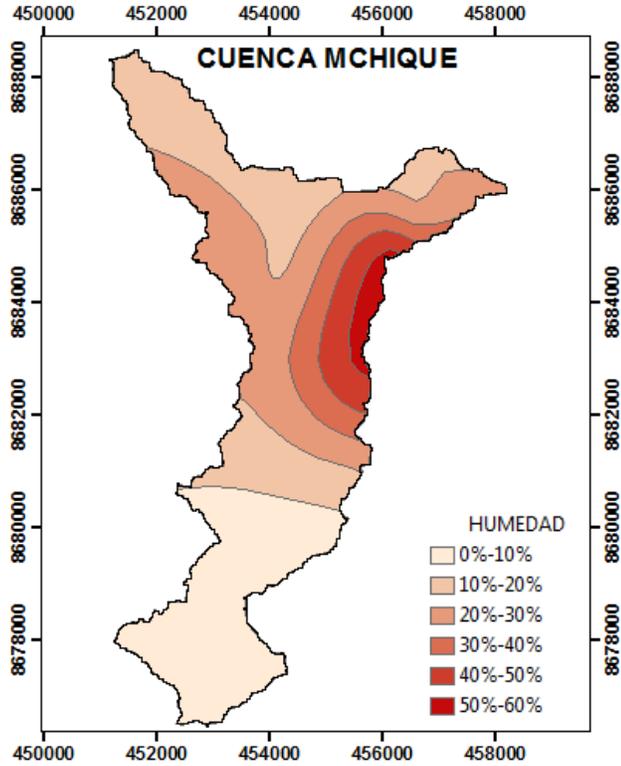
**Figura 82:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Setiembre 2014



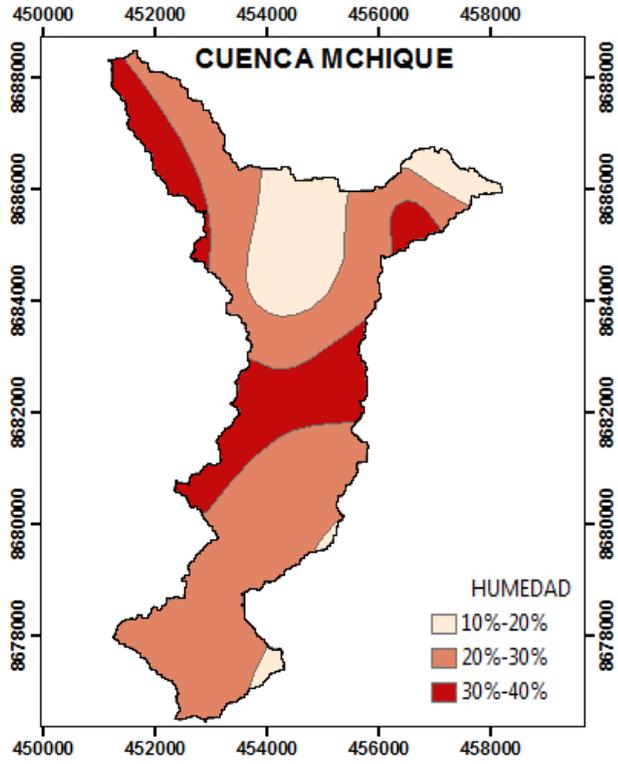
**Figura 83:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Octubre 2014



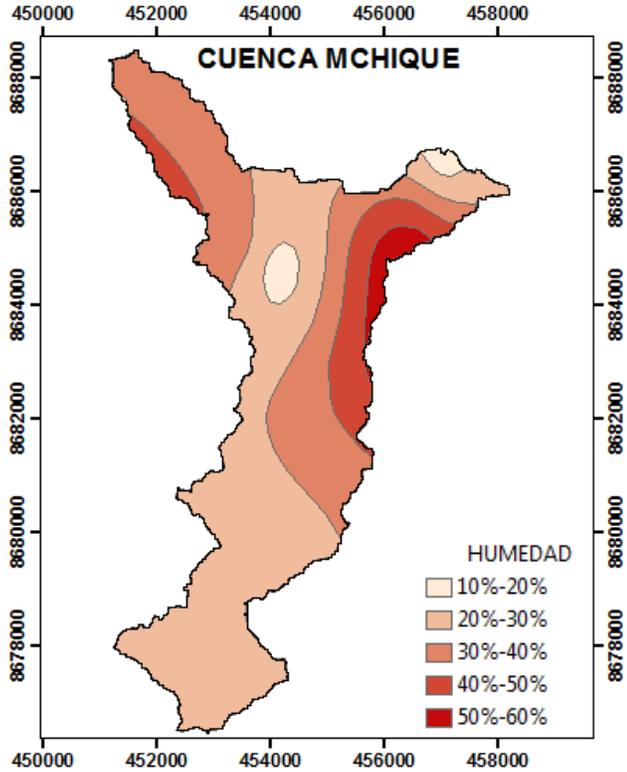
**Figura 84:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Noviembre 2014



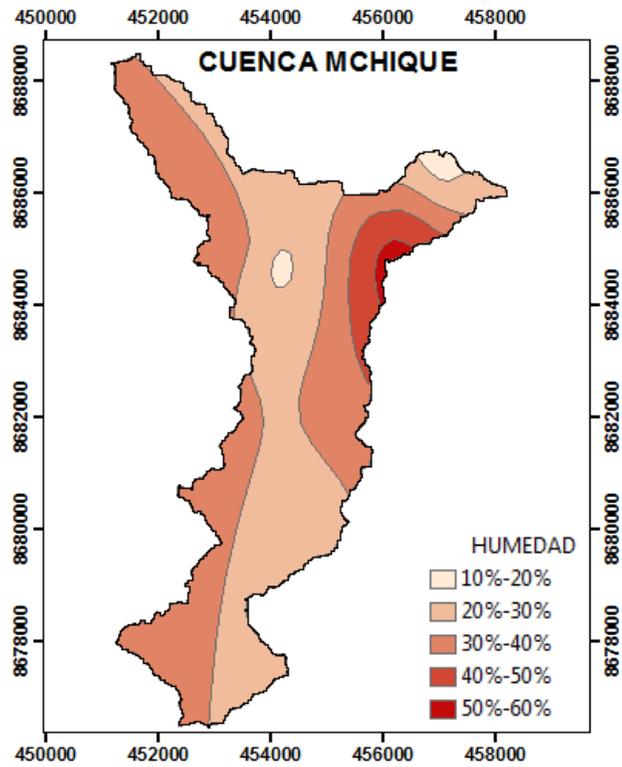
**Figura 85:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Diciembre 2014



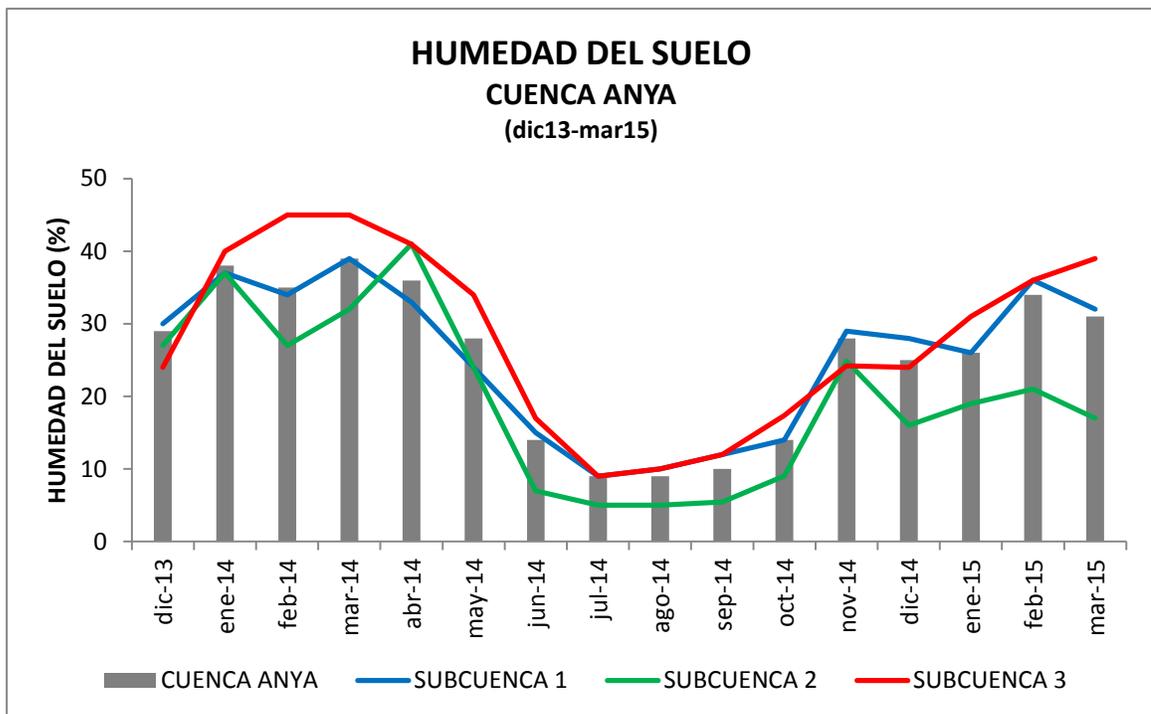
**Figura 86:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Enero 2015



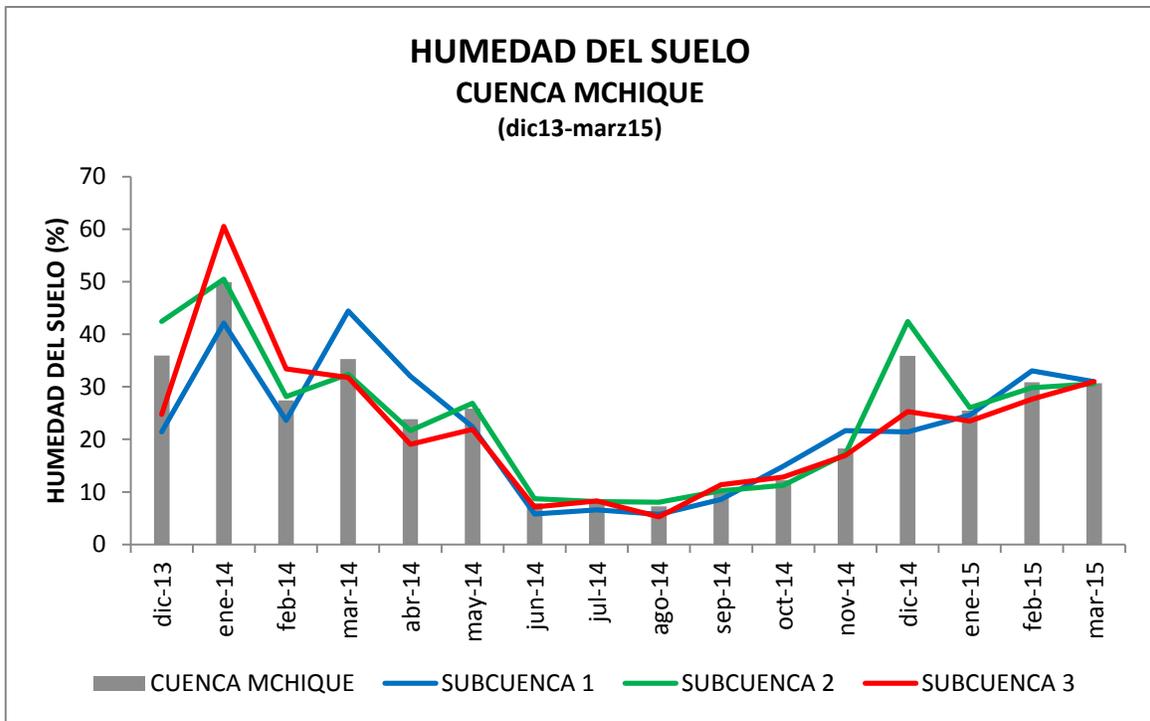
**Figura 87:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Febrero 2015



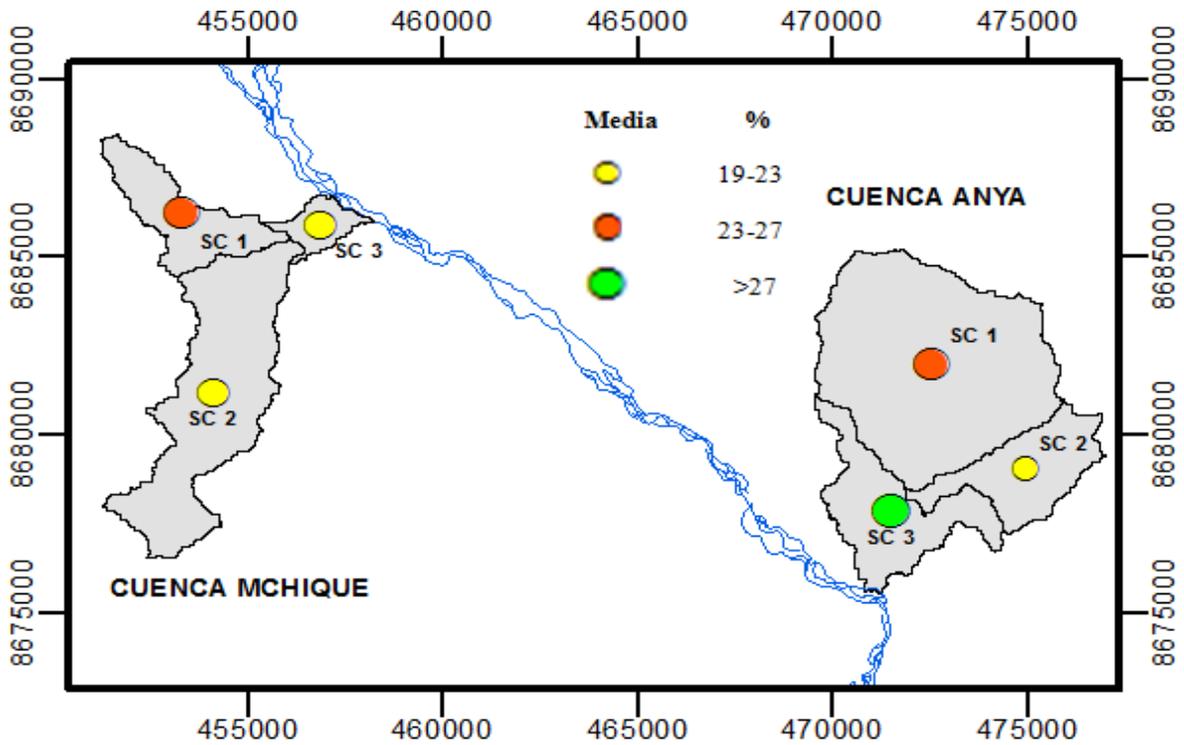
**Figura 88:** Mapa de humedad del suelo de la cuenca Mchique, Marzo 2015



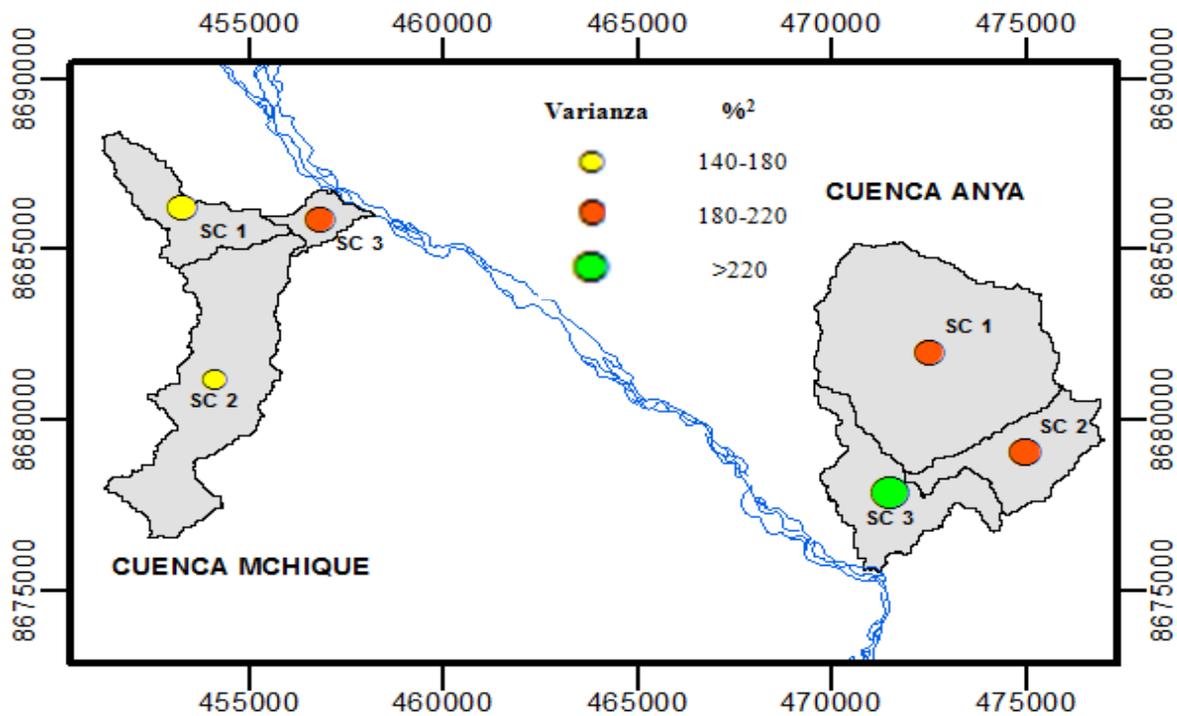
**Figura 89:** Serie temporal de la humedad del suelo de la cuenca Anya



**Figura 90:** Serie temporal de la humedad del suelo de la cuenca Mchique

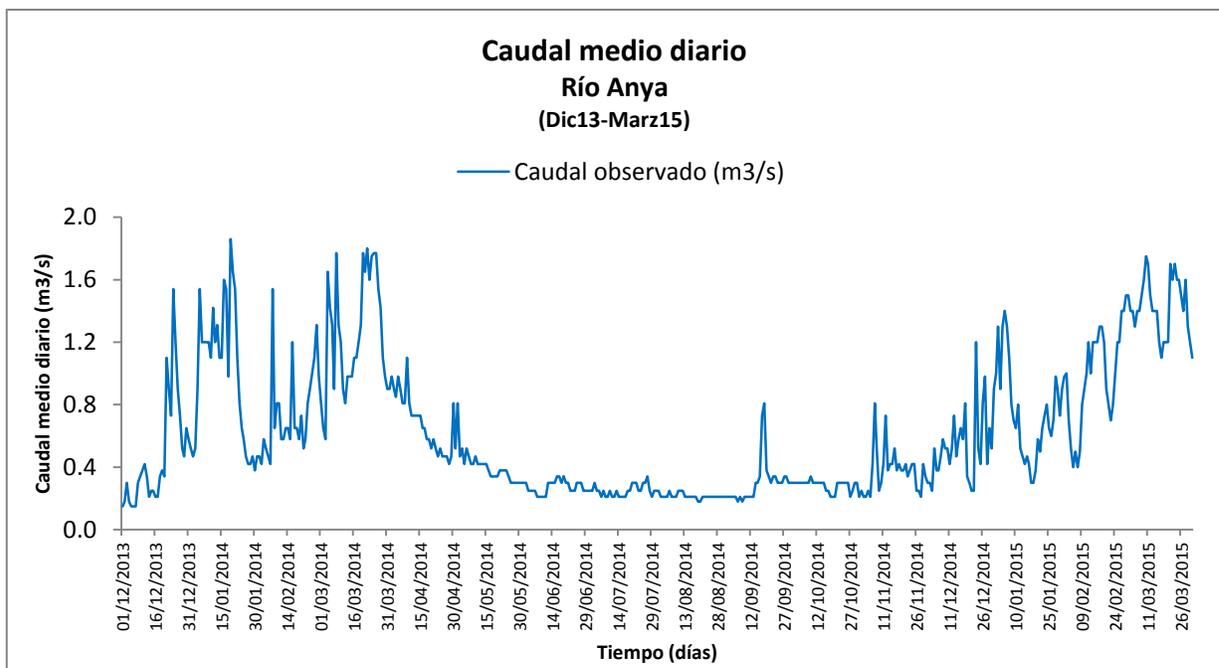


**Figura 91:** Variación espacial de la media de la humedad del suelo (%), dic13-mar15

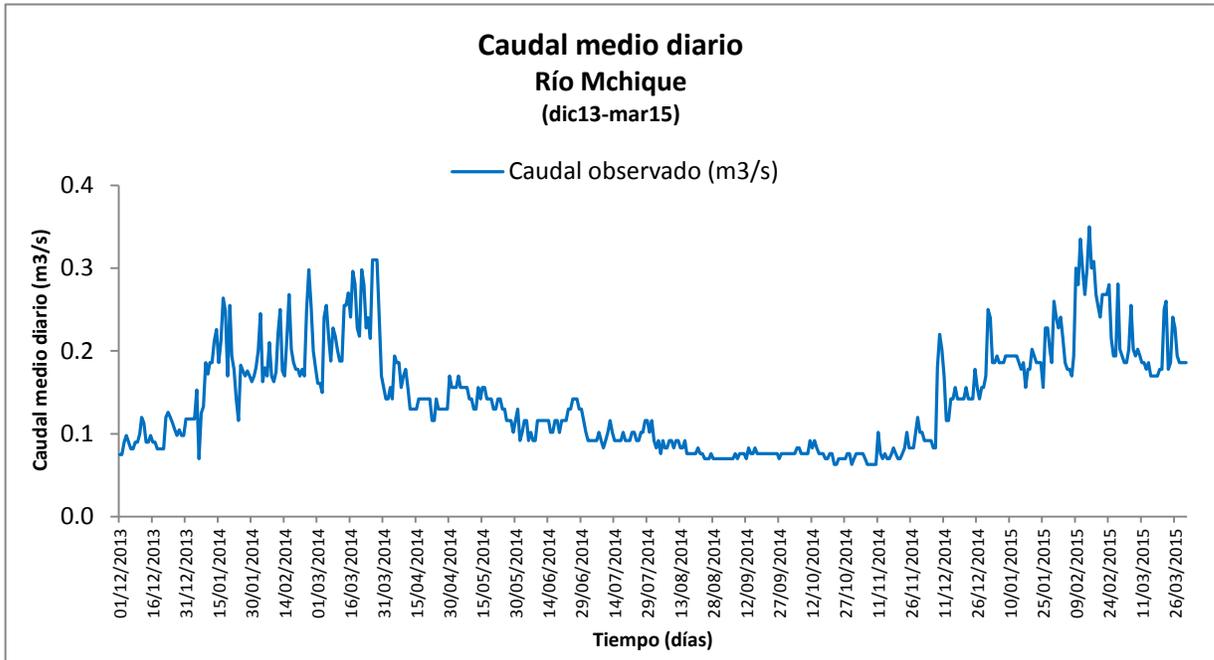


**Figura 92:** Variación espacial de la varianza de la humedad del suelo (%<sup>2</sup>), dic13-mar15

### Anexo 2.3: Hidrometría

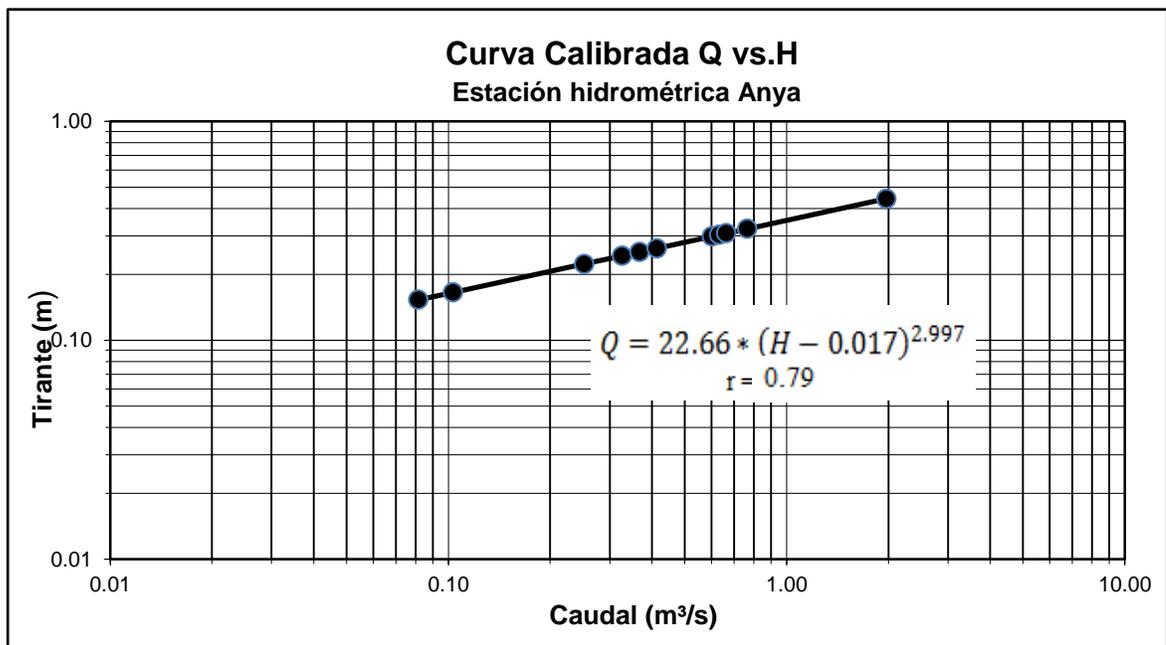


**Figura 93:** Caudales medios diarios observados del río Anya, periodo dic13-mar15

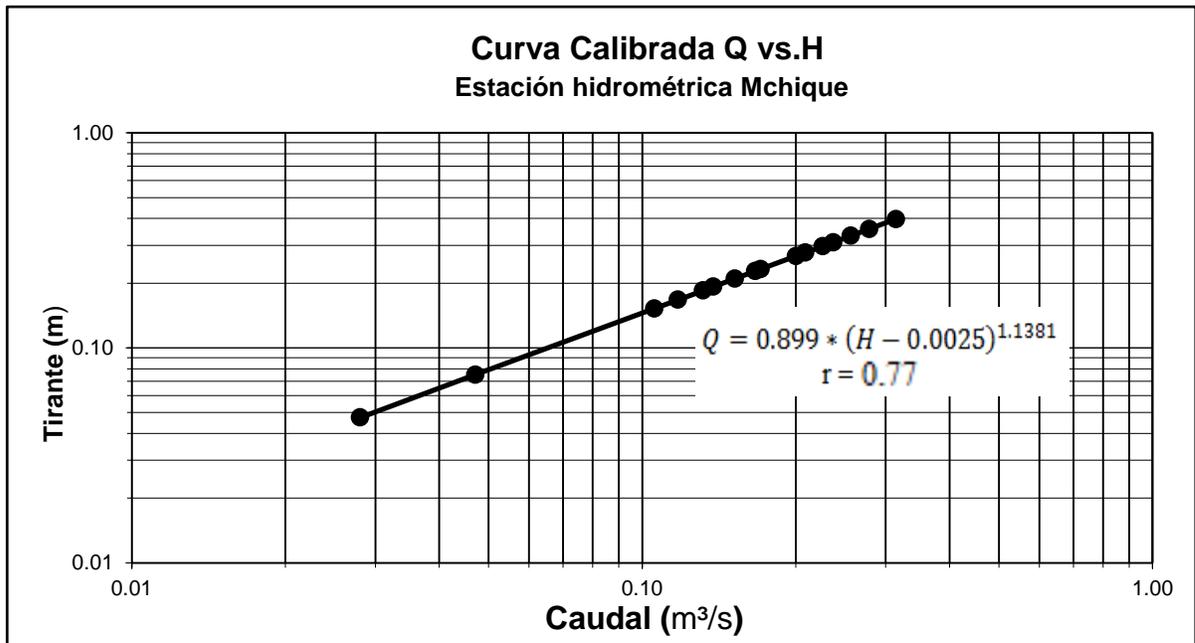


**Figura 94:** Caudales medios diarios observados del río Mchique, periodo dic13-mar15

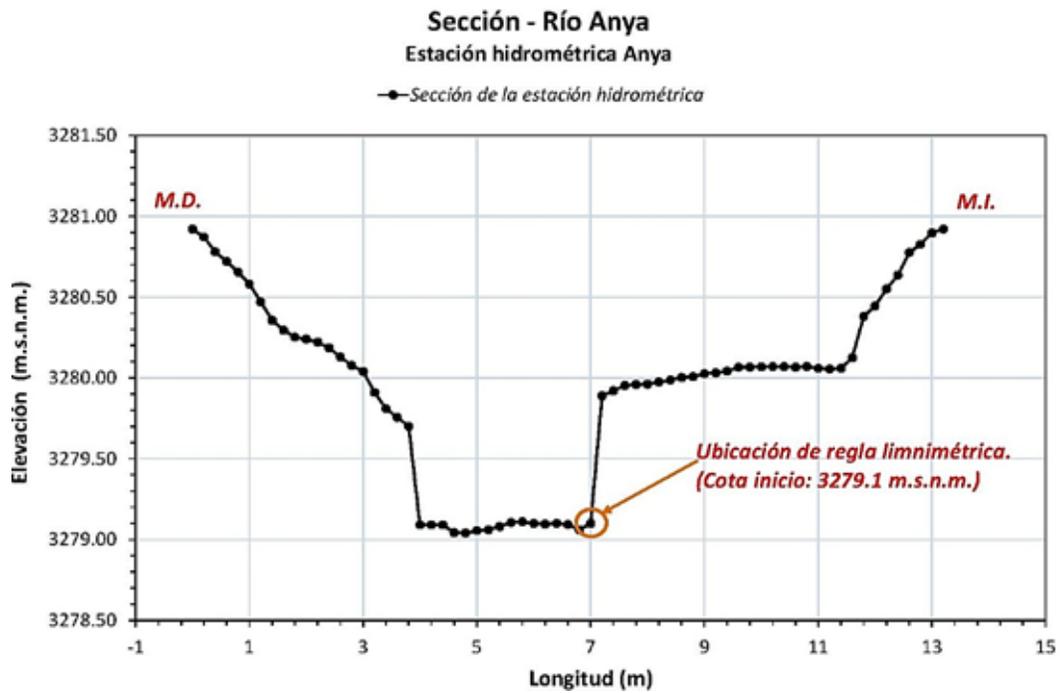
**Curvas de calibración de las estaciones hidrométricas Anya y Mchique  
(Diciembre 2013-Marzo 2015)**



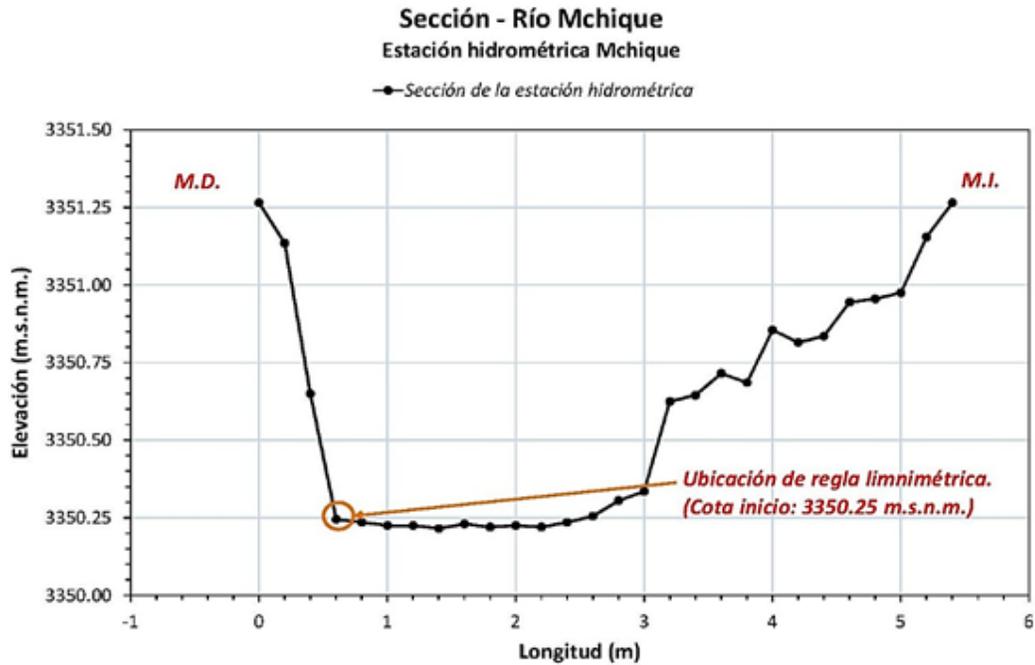
**Figura 95:** Curva de calibración de la estación Anya, periodo dic13-mar15



**Figura 96:** Curva de calibración de la estación Mchique, periodo dic13-mar15

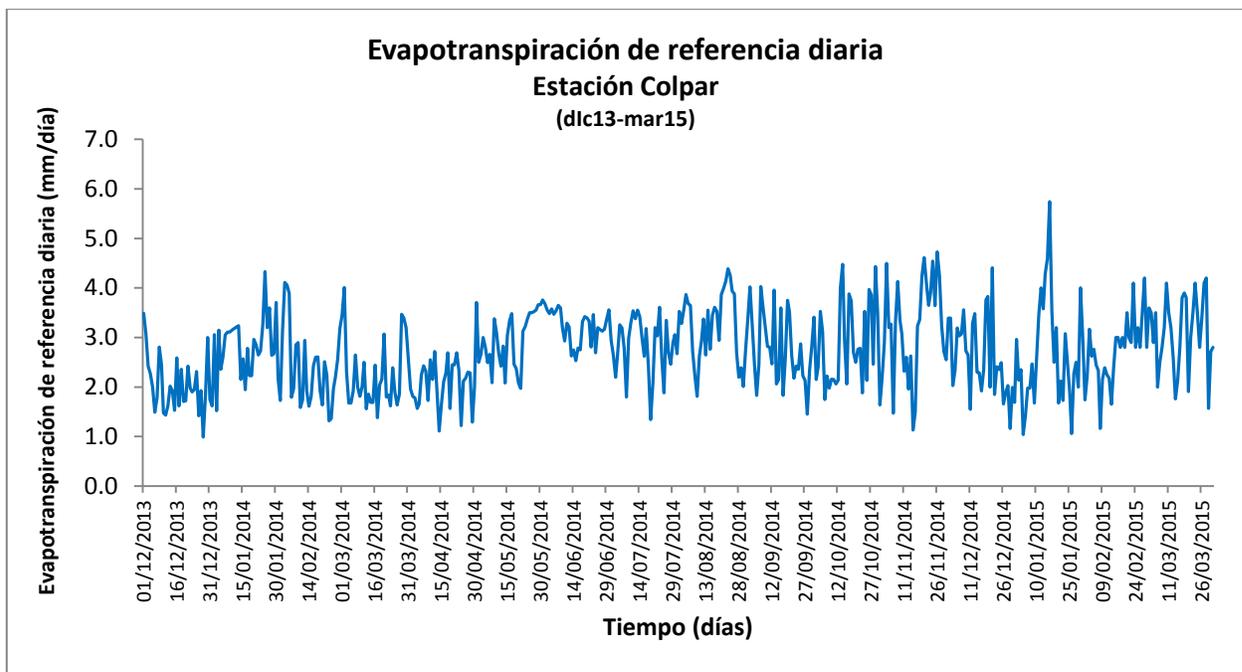


**Figura 97:** Sección típica del río Anya, estación hidrométrica Anya

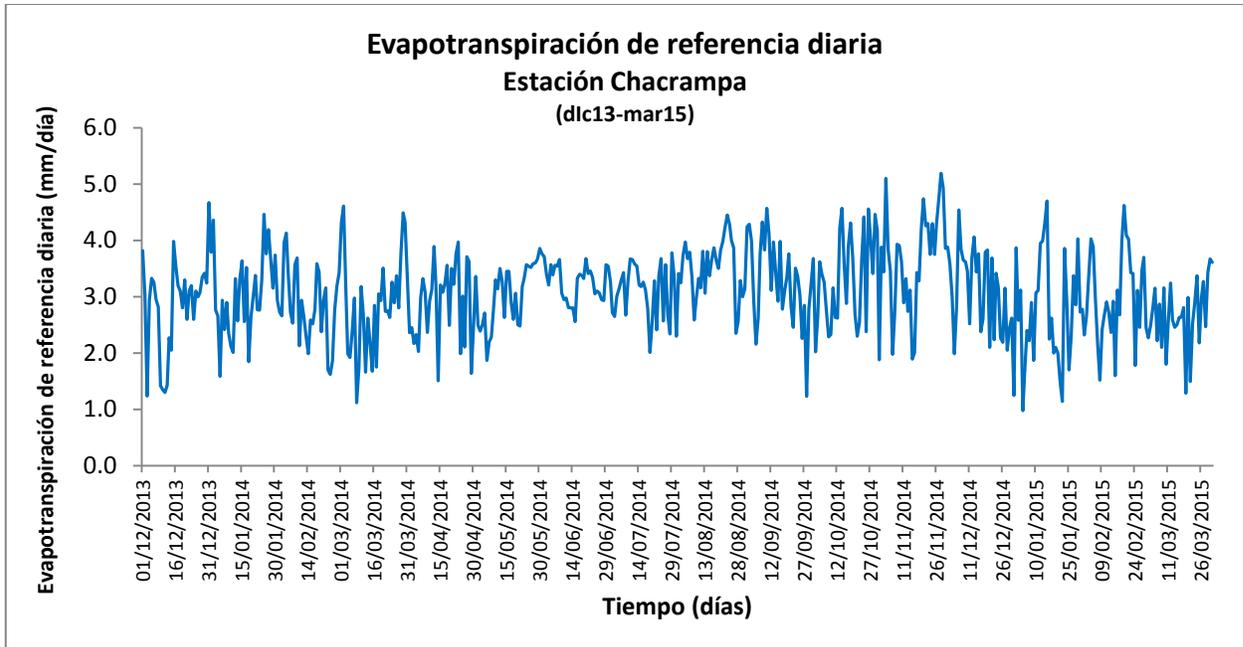


**Figura 98:** Sección típica del río Anya, estación hidrométrica Mchique

**Anexo 2.4: Series de evapotranspiración de referencia (mm/día)**



**Figura 99:** Serie de evapotranspiración de referencia diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Colpar

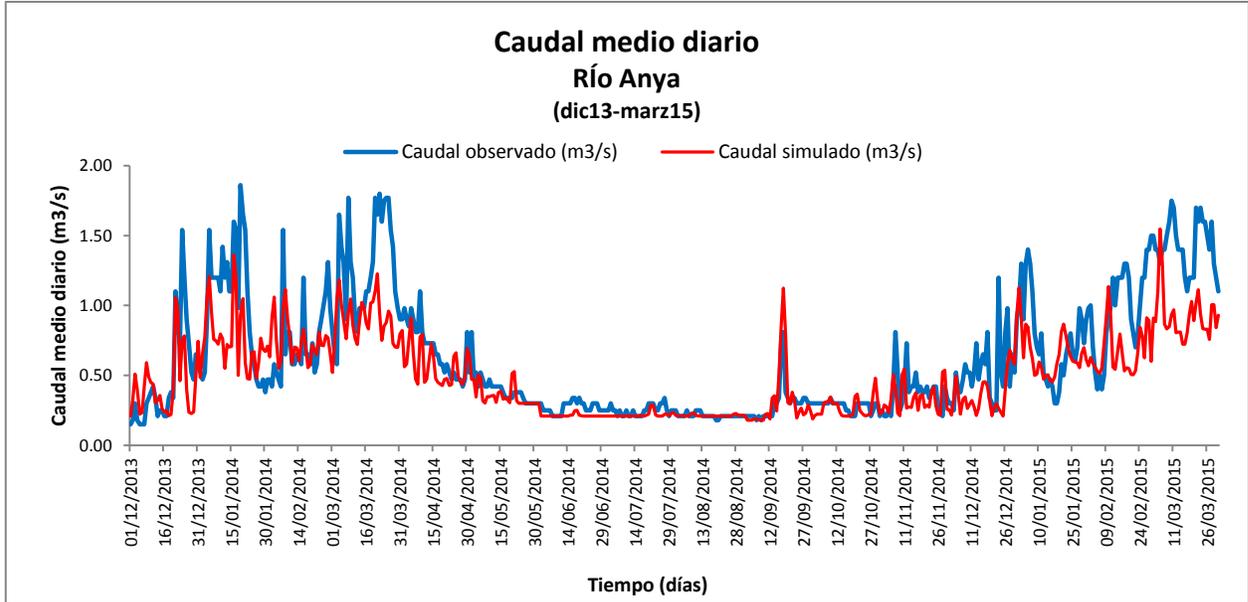


**Figura 100:** Serie de evapotranspiración de referencia diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Chacampa

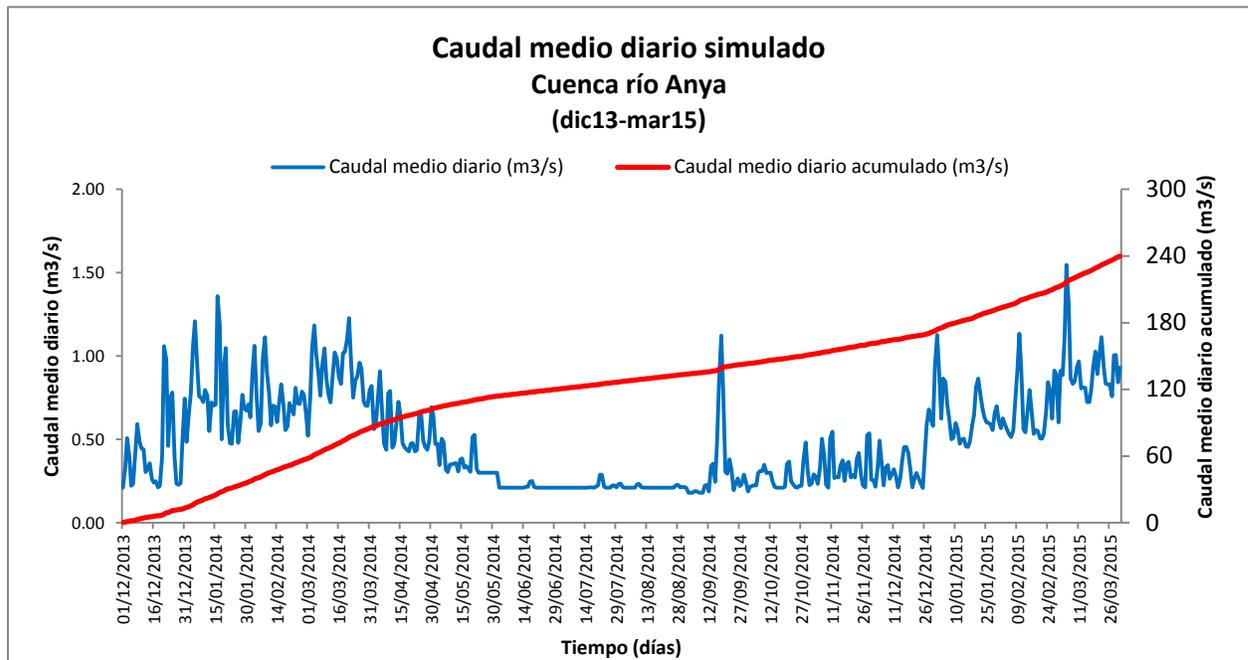
### Anexo 3: Simulación del comportamiento hidrológico de las cuencas

#### Anexo 3.1: Sistema de modelación hidrológica Hec-Hms

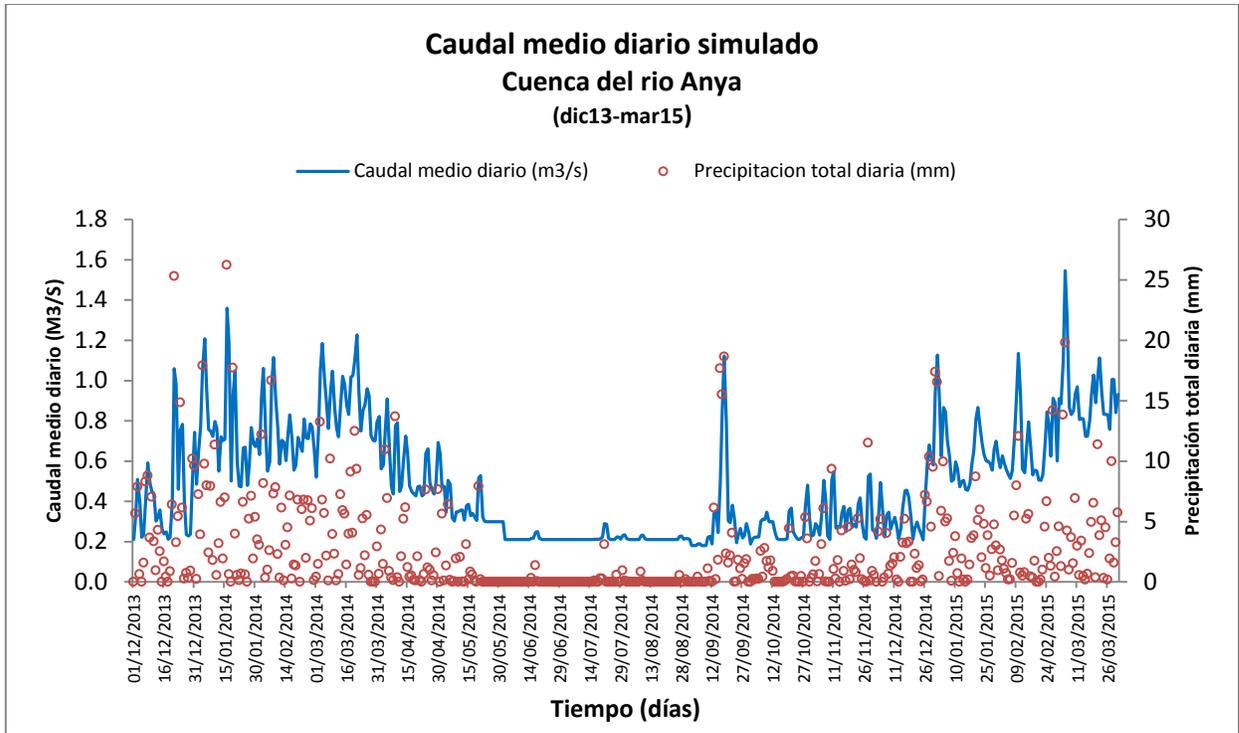
##### a) Modelación de la cuenca Anya



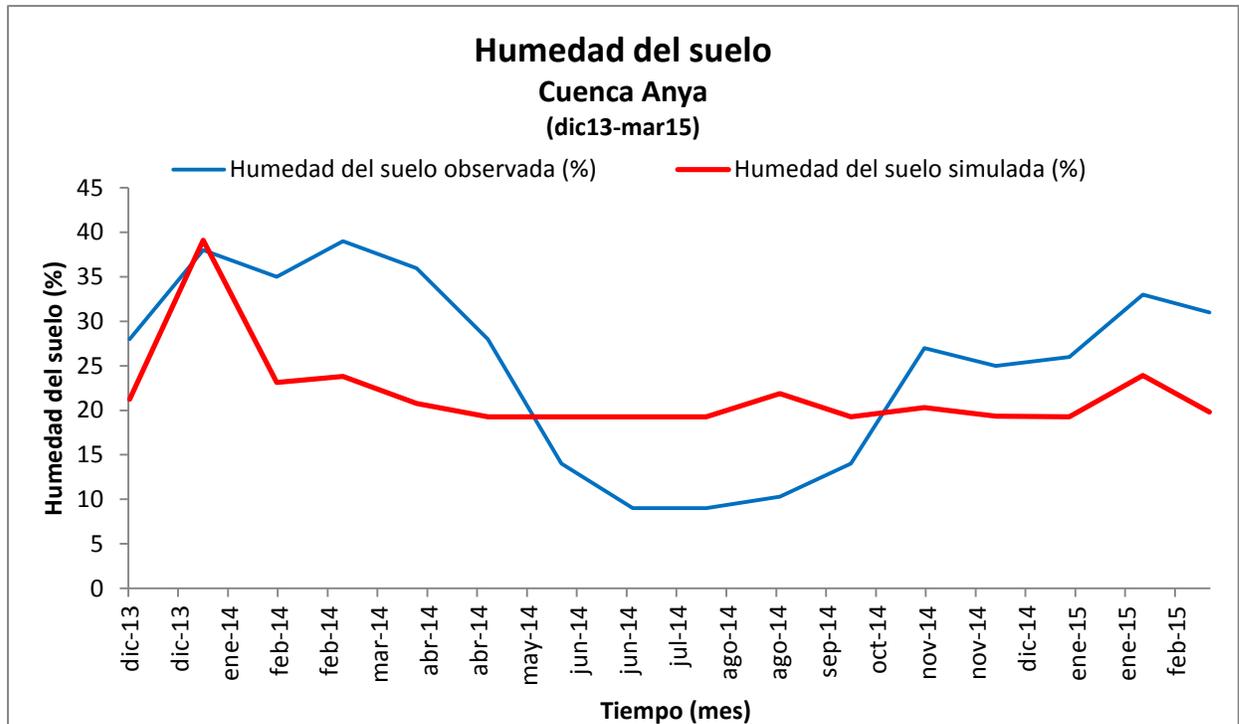
**Figura 101:** Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic13-mar15



**Figura 102:** Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Anya, periodo dic13-mar15

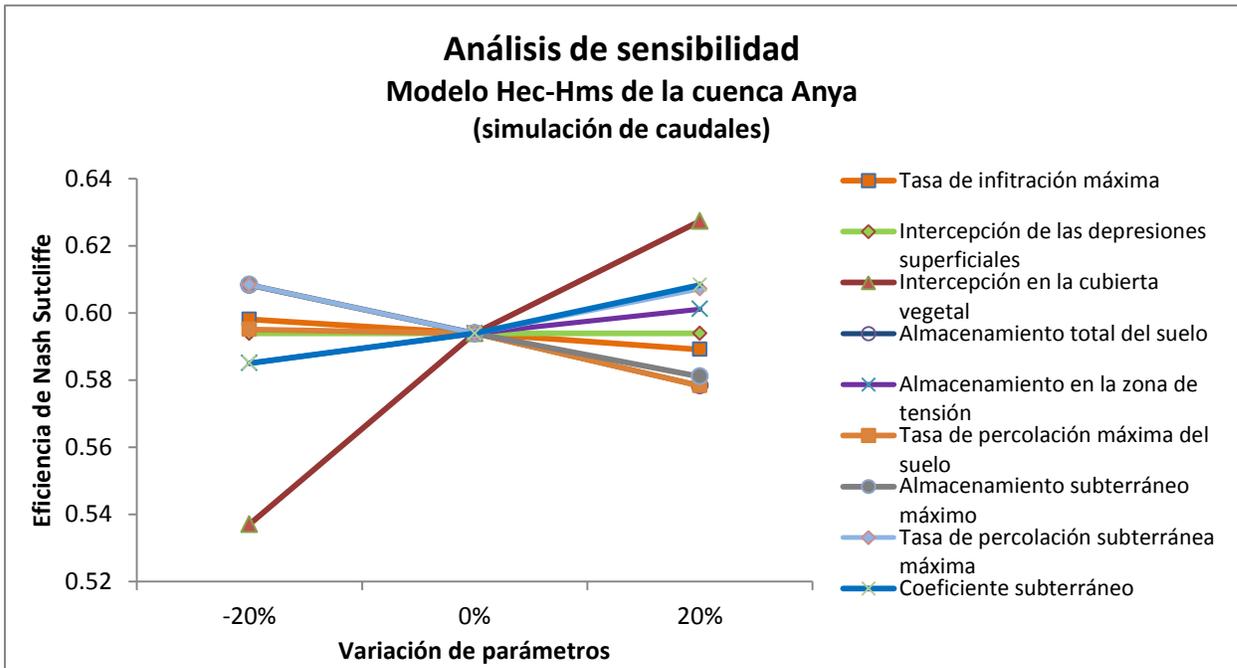


**Figura 103:** Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Anya, periodo dic13-mar15

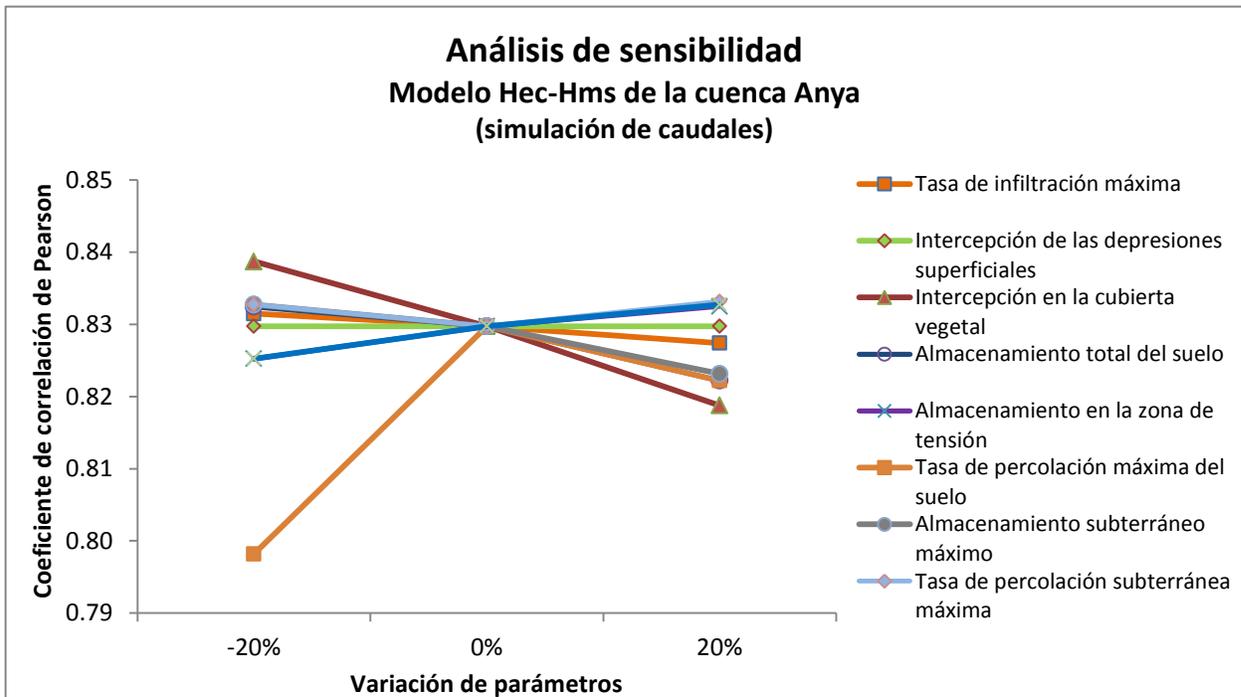


**Figura 104:** Humedad observada y simulada de la cuenca Anya, periodo dic13-mar15

### Análisis de sensibilidad de los caudales

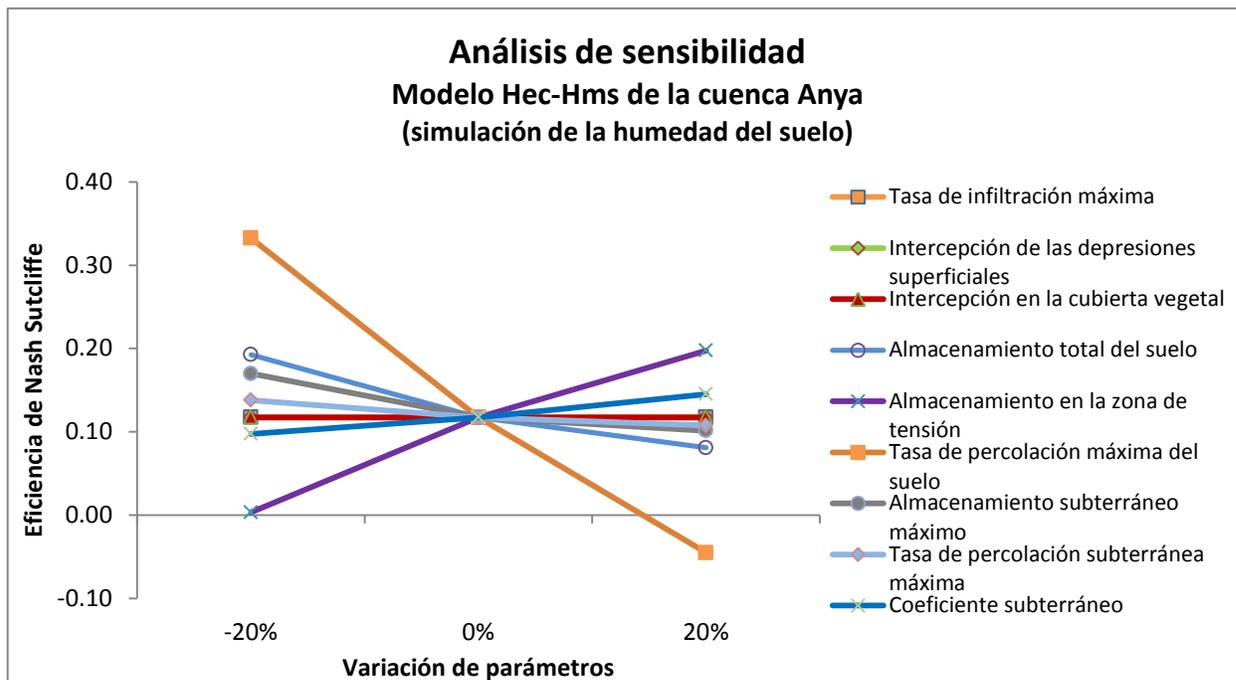


**Figura 106:** Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Anya, eficiencia de Nash Sutcliffe de los caudales simulados

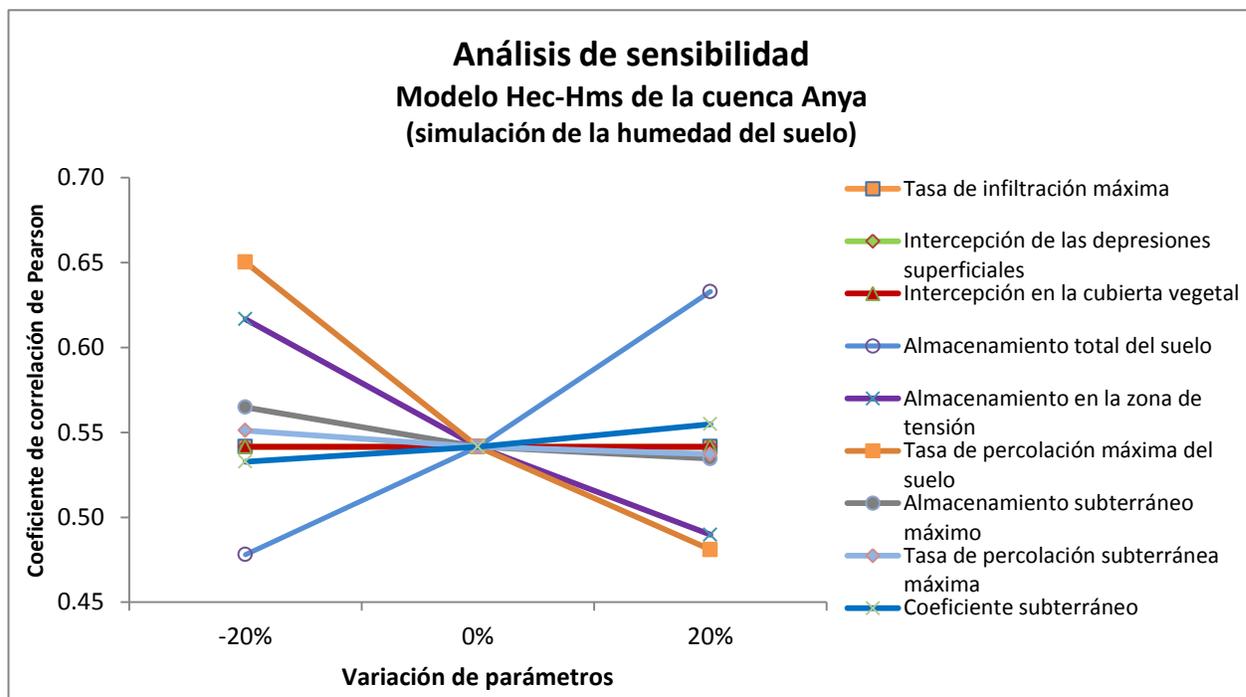


**Figura 105:** Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Anya, coeficiente de correlación de Pearson de los caudales simulados

## Análisis de sensibilidad de la humedad del suelo

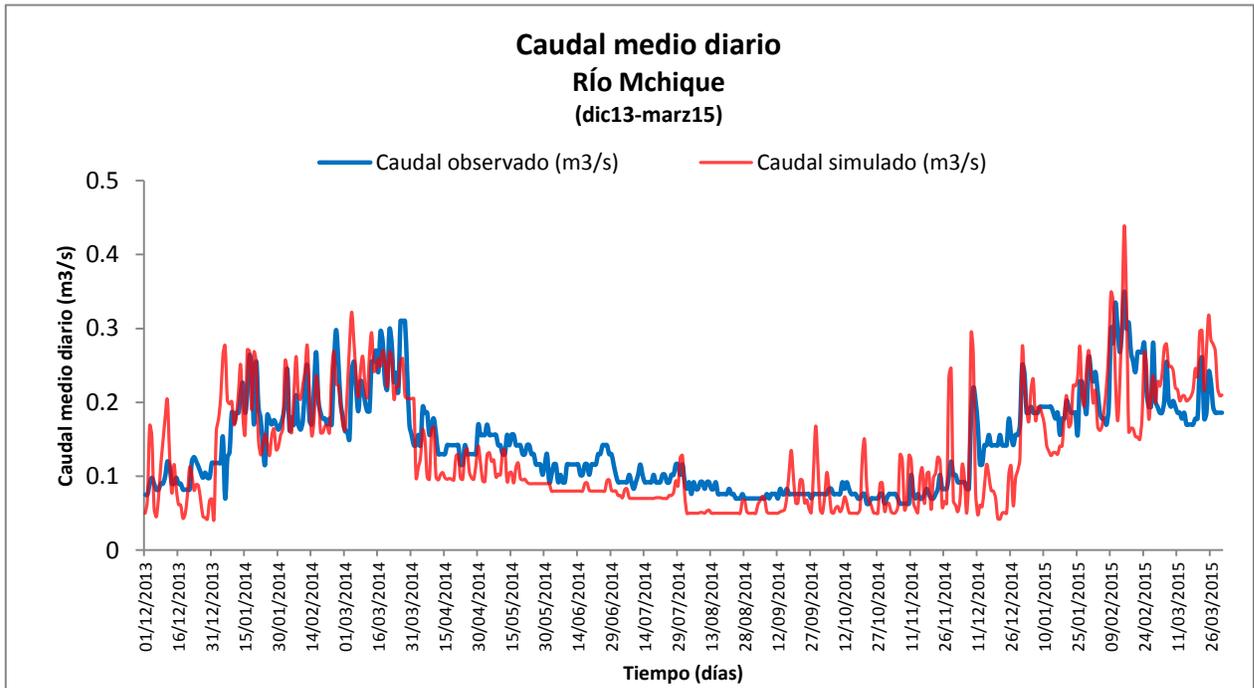


**Figura 107:** Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Anya, eficiencia de Nash Sutcliffe de los caudales simulados

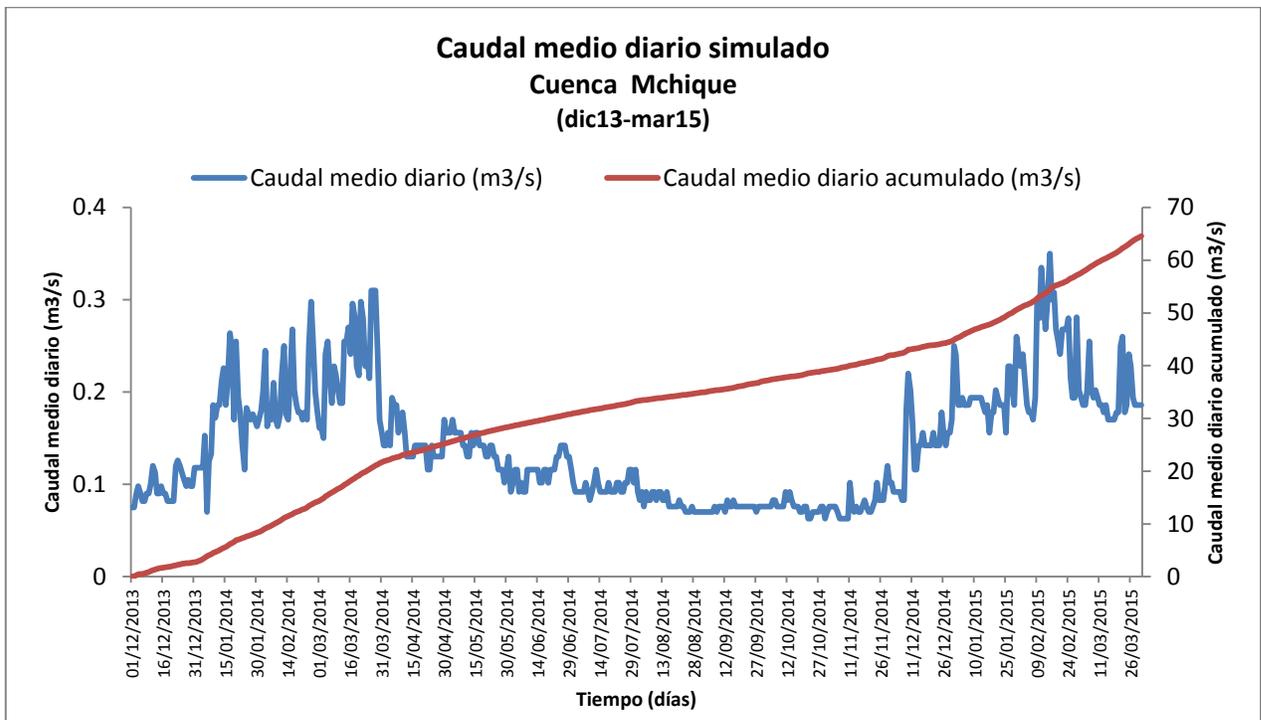


**Figura 108:** Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Anya, coeficiente de correlación de Pearson de la humedad simulada

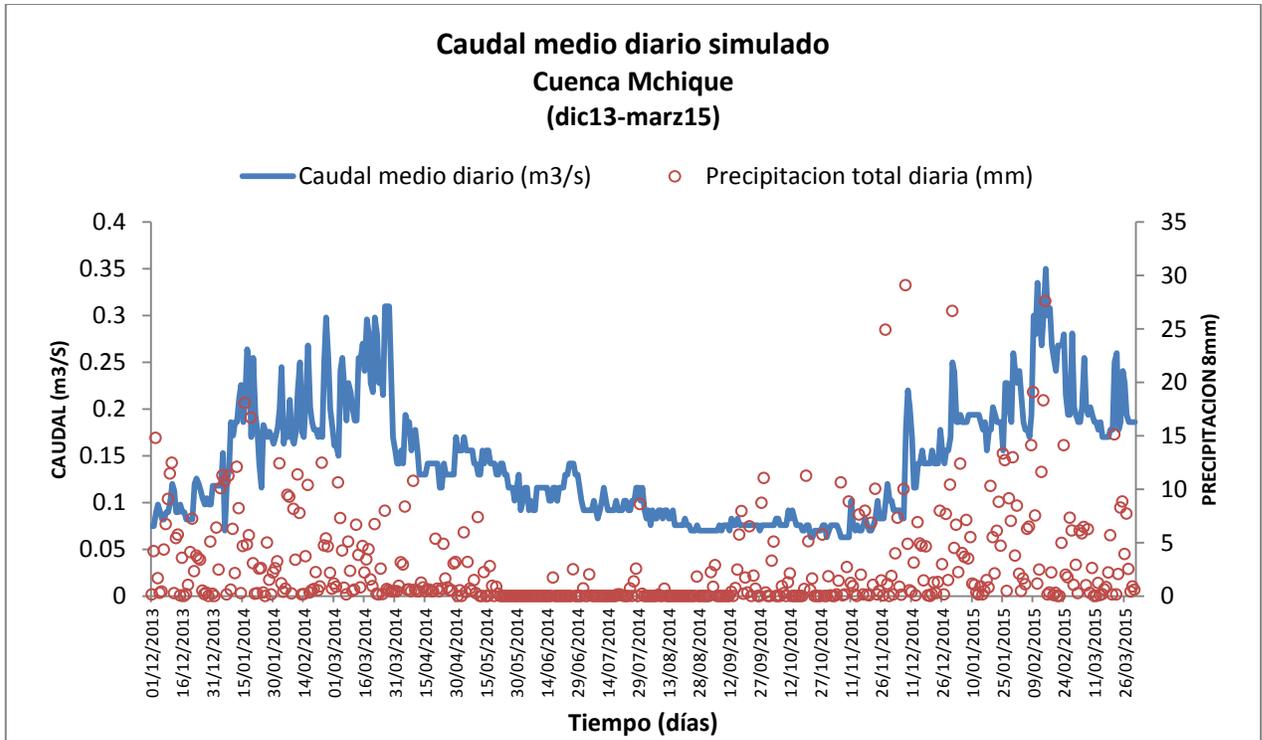
### a) Modelación de la cuenca Mchique



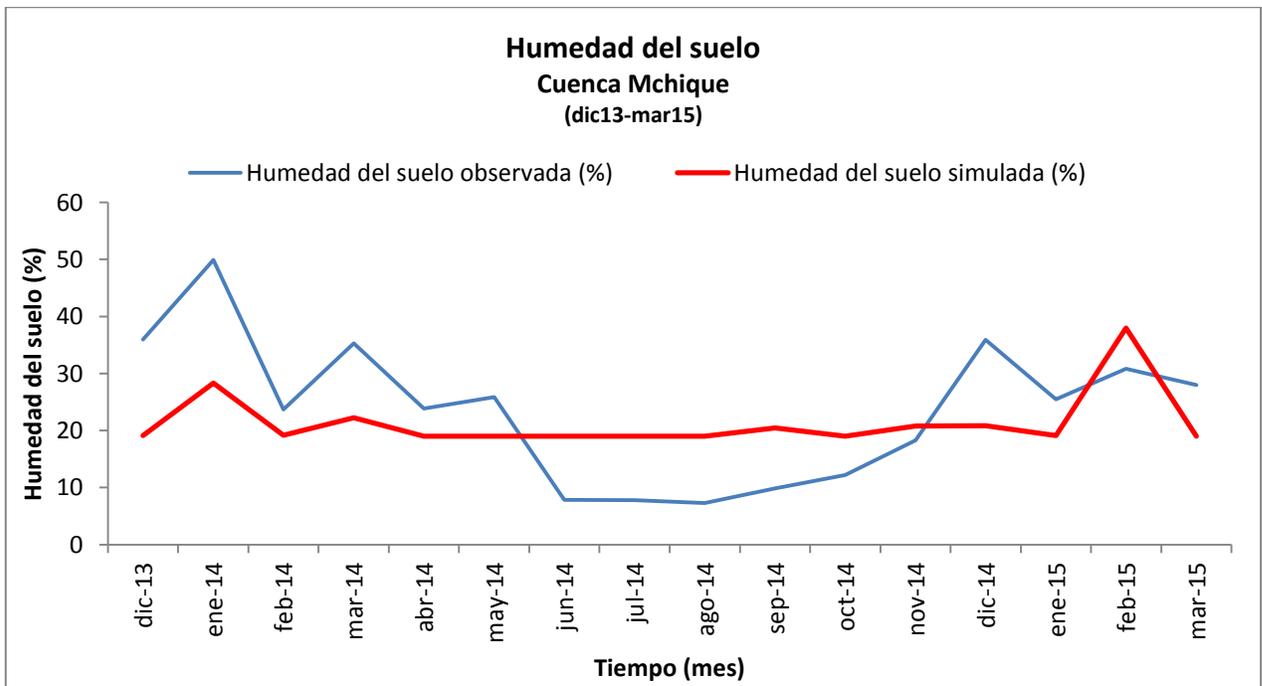
**Figura 109:** Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic13-mar15



**Figura 110:** Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Mchique, periodo dic13-mar15

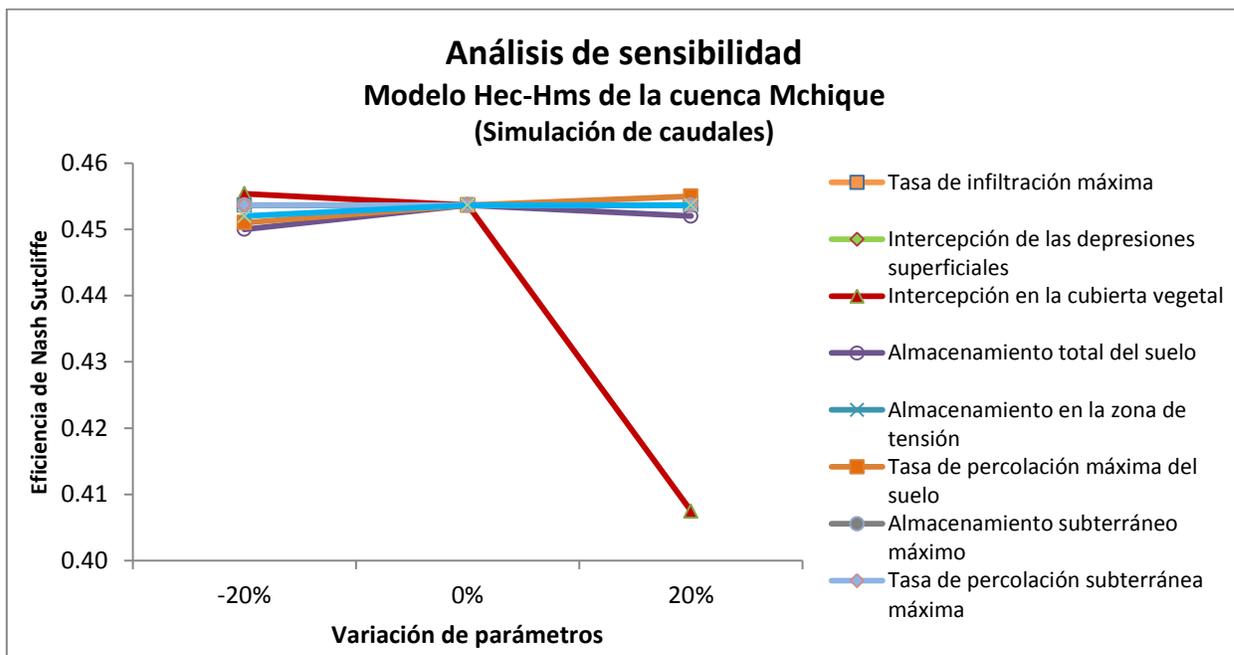


**Figura 111:** Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Mchique, periodo dic13-mar15

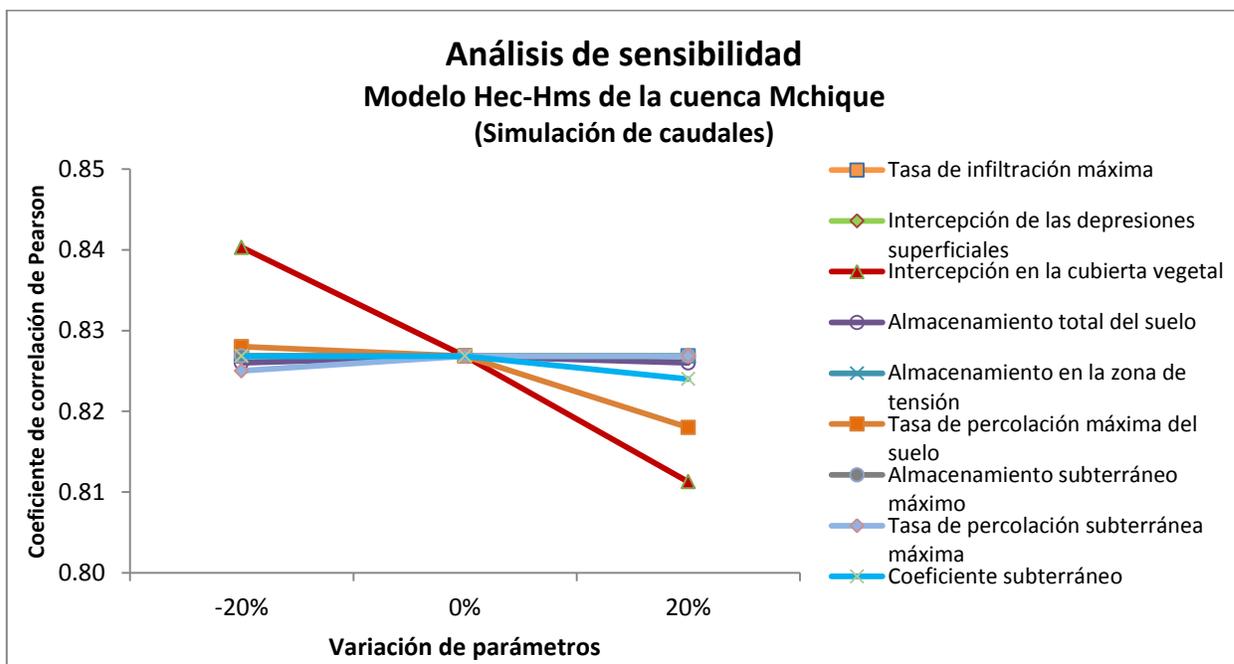


**Figura 112:** Humedad observada y simulada de la cuenca Mchique, periodo dic13-mar15

### Análisis de sensibilidad de los caudales

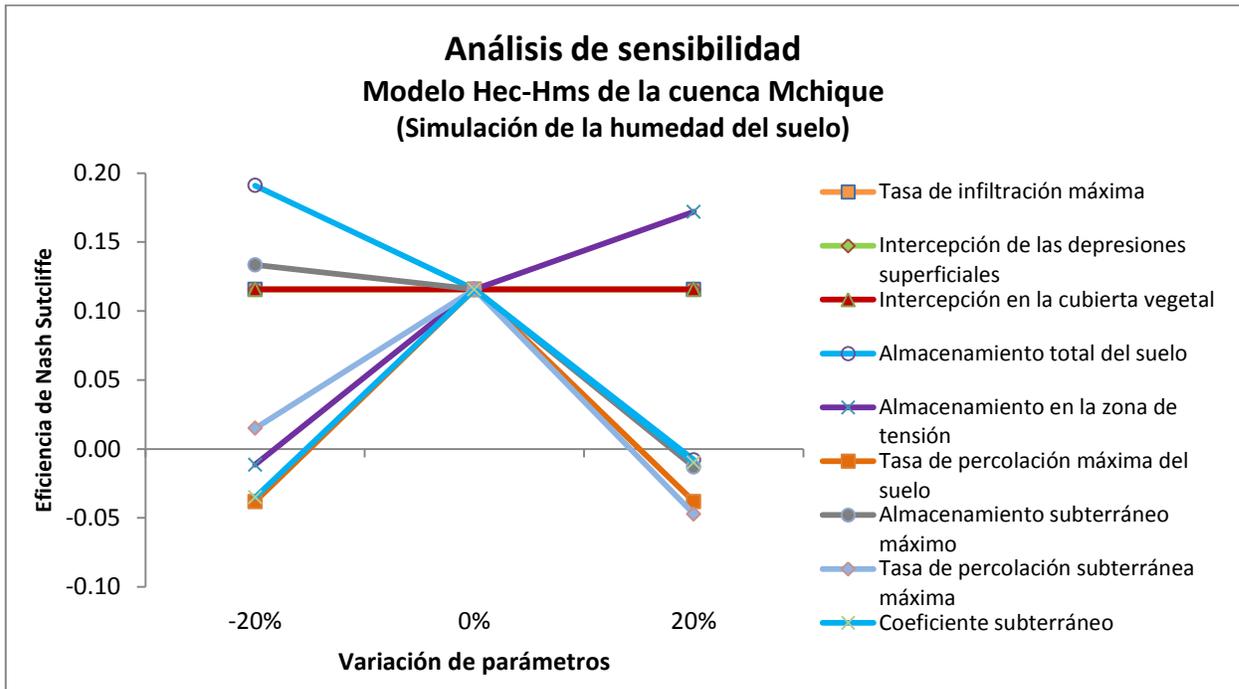


**Figura 113:** Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Mchique, eficiencia de Nash Sutcliffe de los caudales simulados

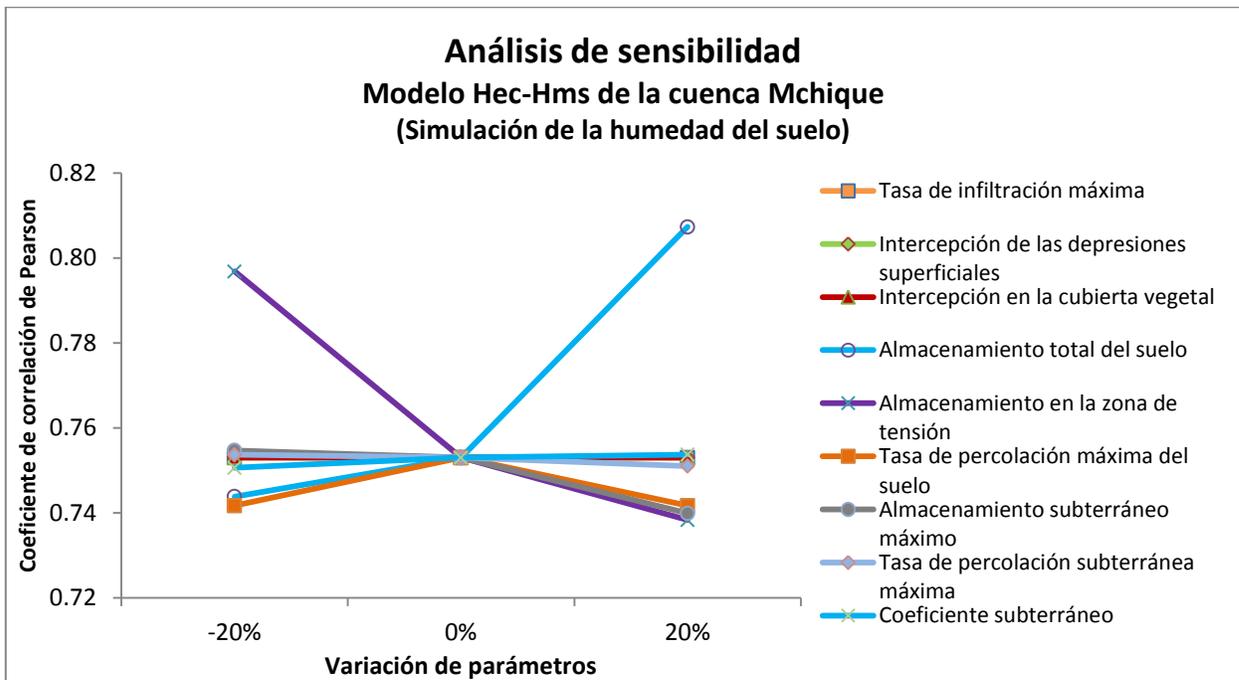


**Figura 114:** Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Mchique, coeficiente de correlación de Pearson de los caudales simulados

## Análisis de sensibilidad de la humedad del suelo



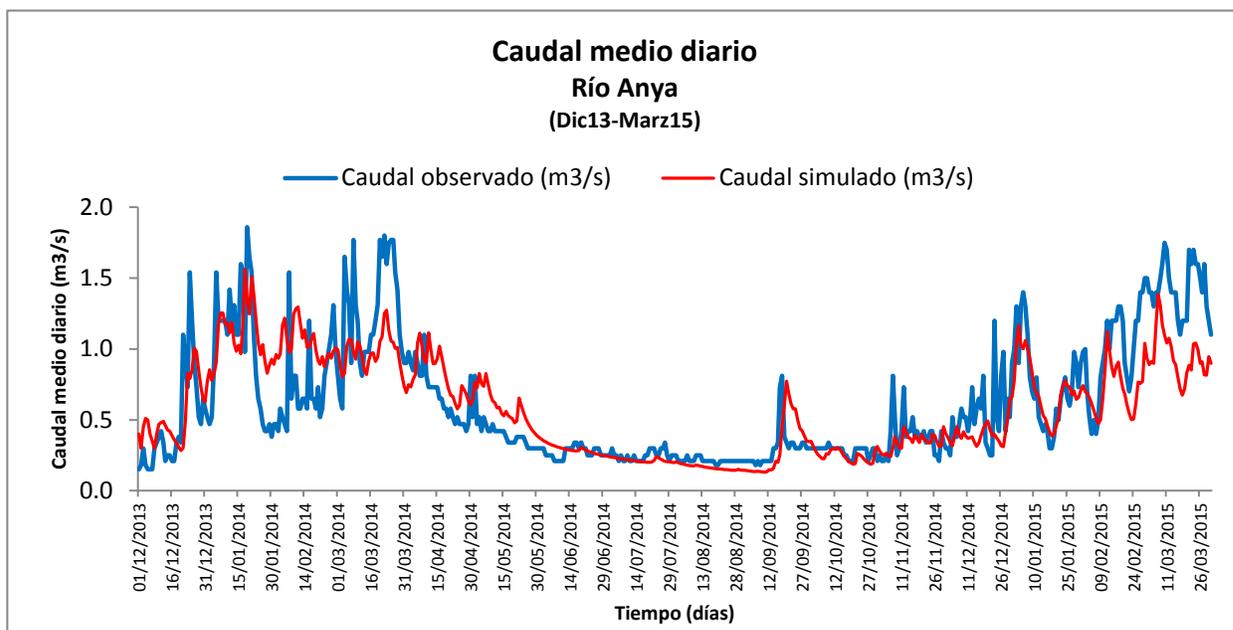
**Figura 115:** Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Mchique, eficiencia de Nash Sutcliffe de la humedad del suelo



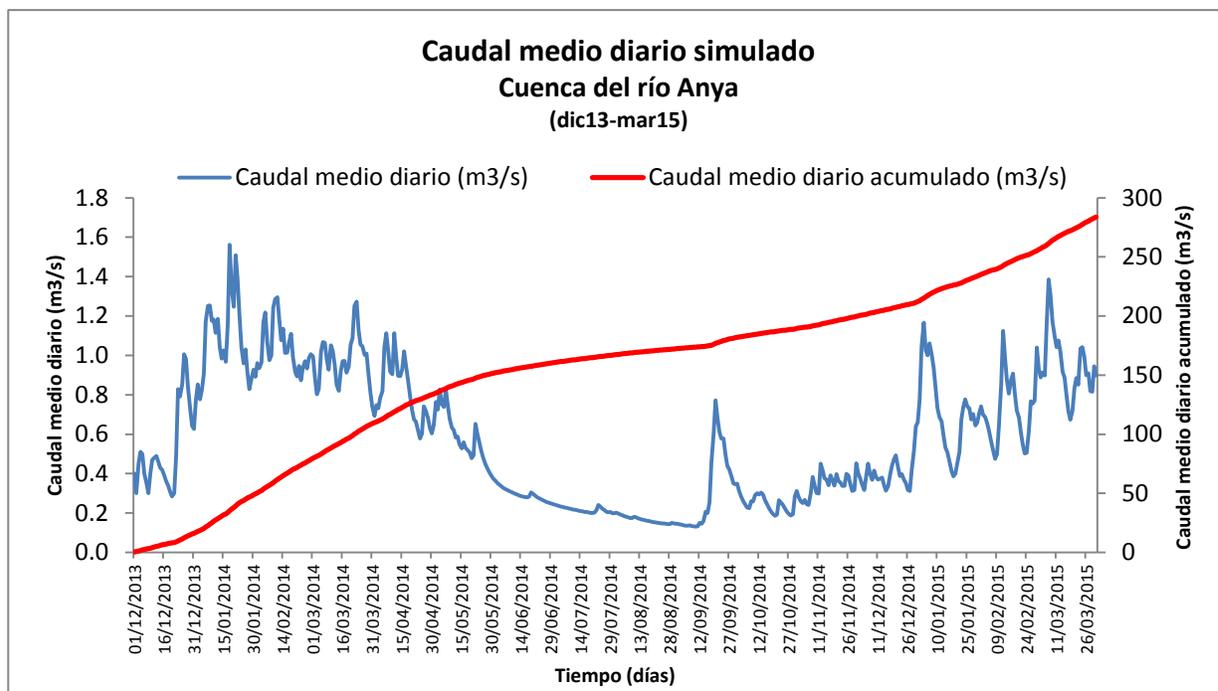
**Figura 116:** Sensibilidad de parámetros del SMH Hec-Hms de la cuenca Mchique, coeficiente de correlación de Pearson de la humedad del suelo

## Anexo 3.2: Modelo hidrológico R.S-Minerve

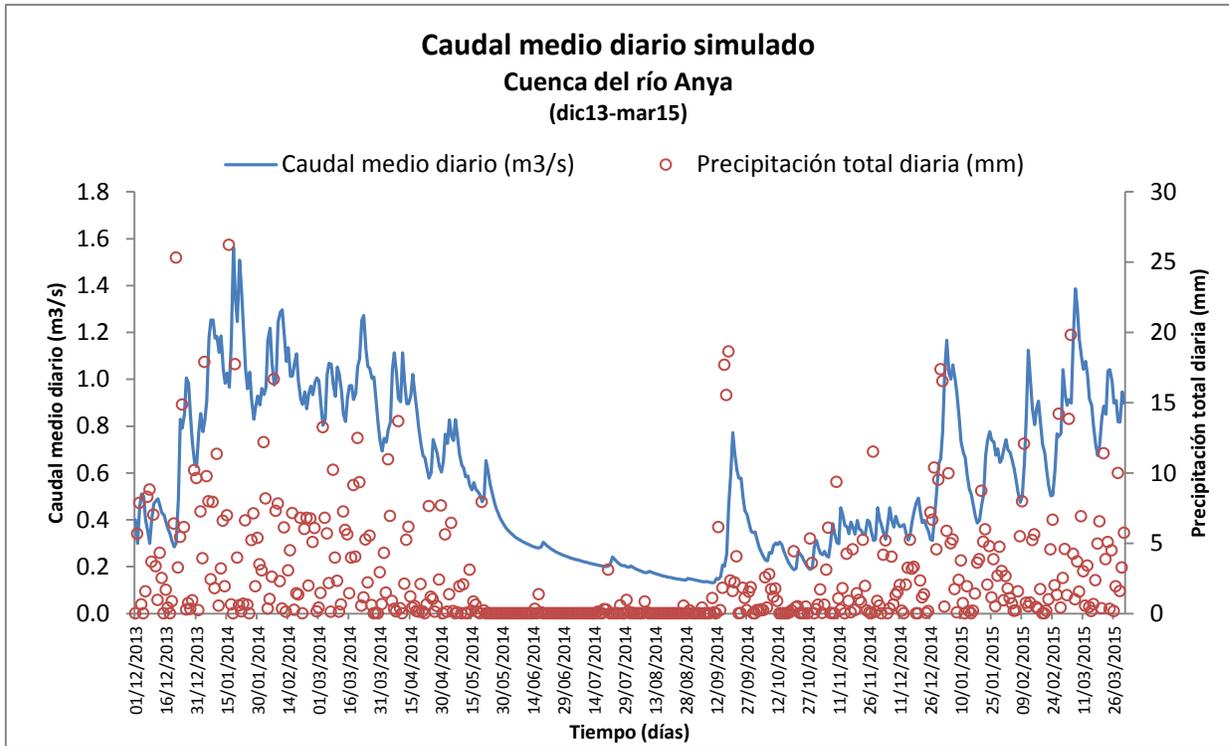
### a) Modelación de la cuenca Anya



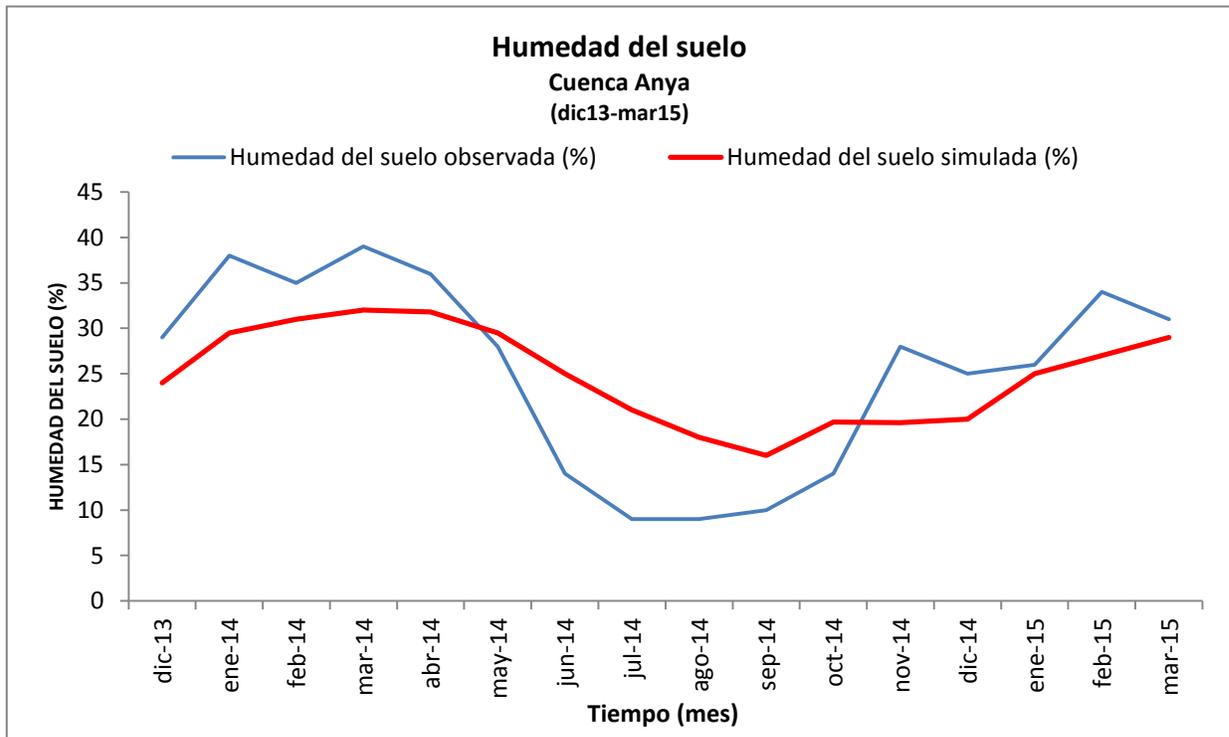
**Figura 117:** Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic13-mar15



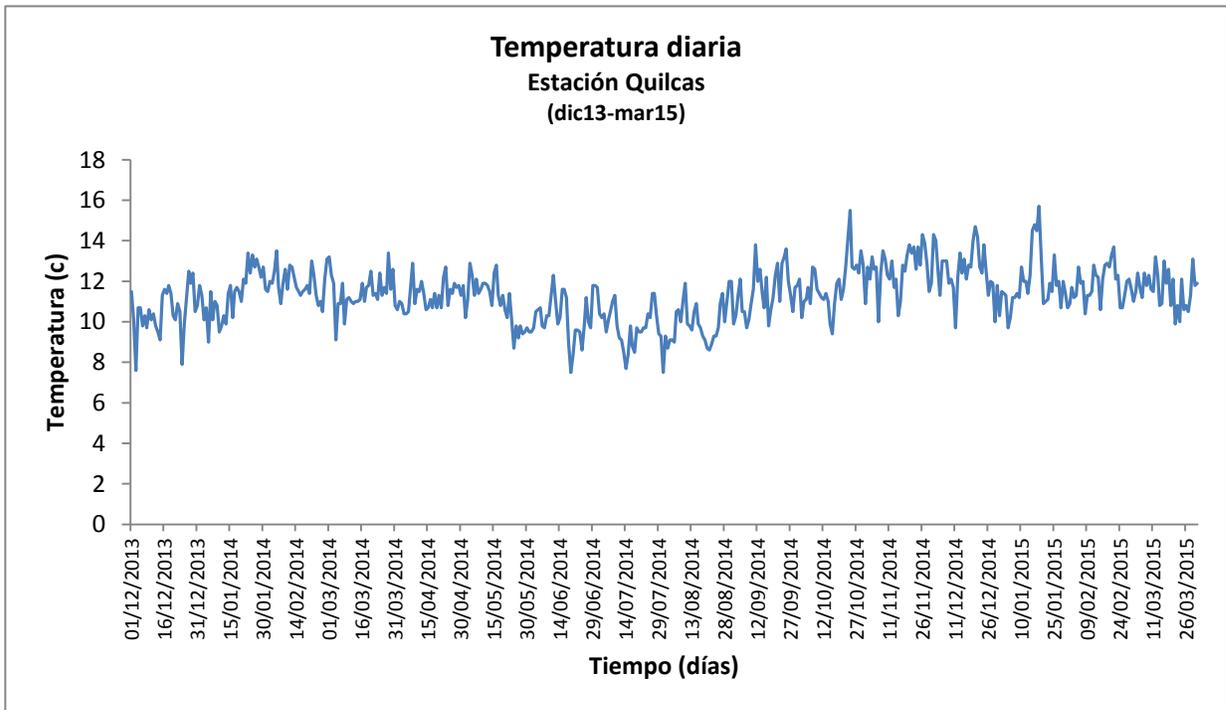
**Figura 118:** Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Anya periodo dic13-mar15



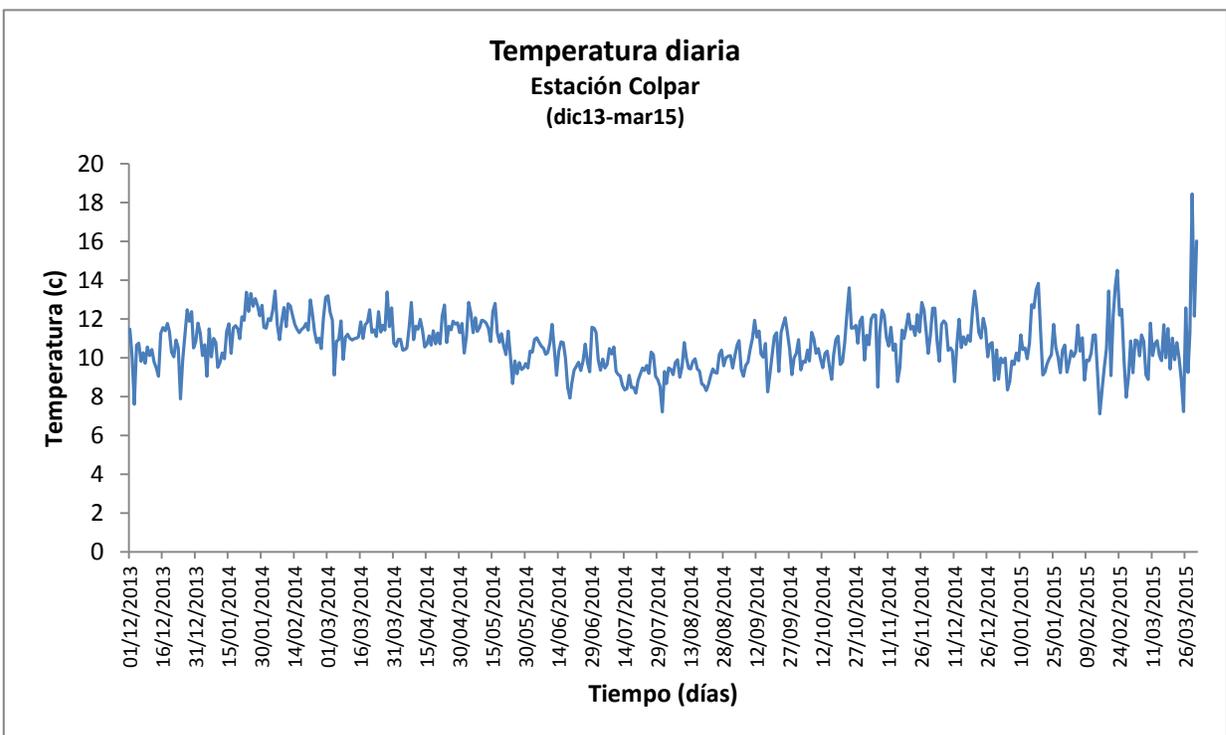
**Figura 119:** Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Anya, periodo dic13-mar15



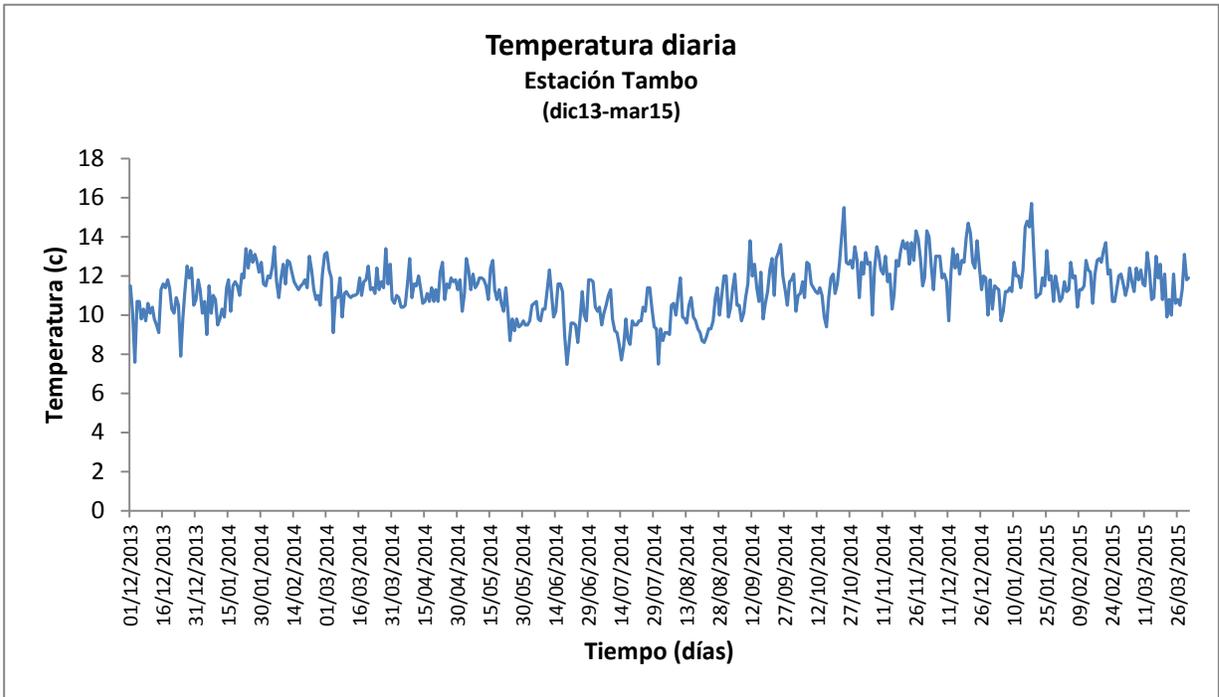
**Figura 120:** Humedad observada y simulada de la cuenca Anya, periodo dic13-mar15



**Figura 121:** Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Quilcas

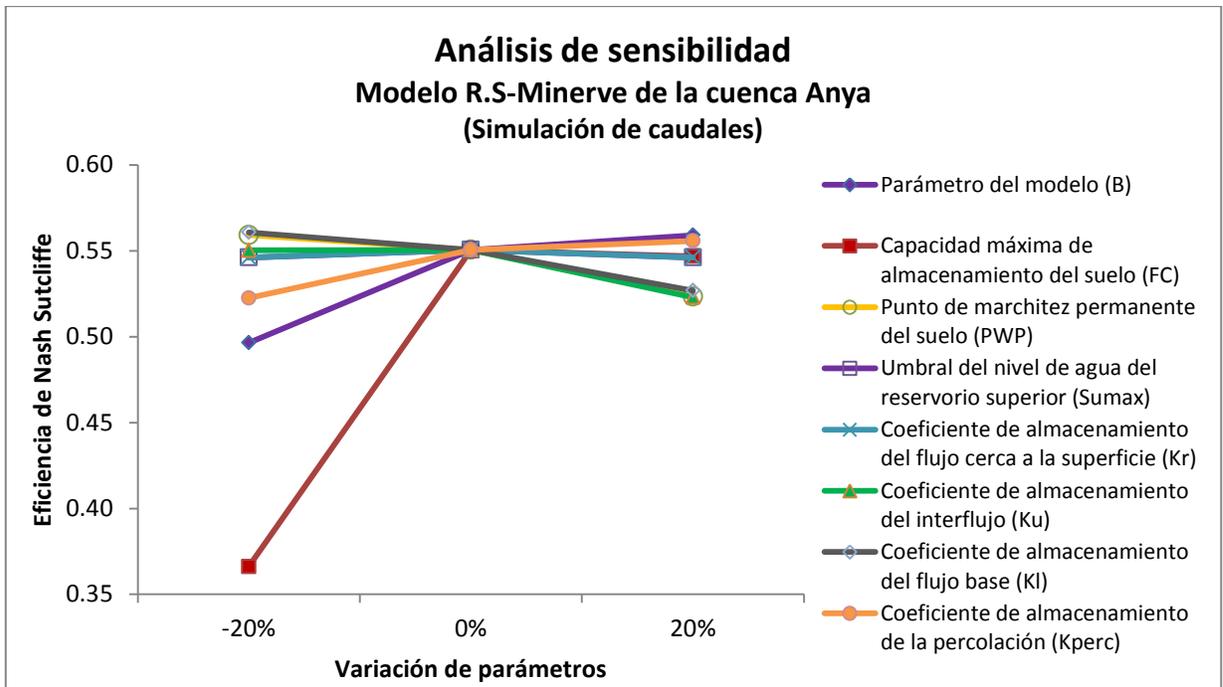


**Figura 122:** Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Colpar

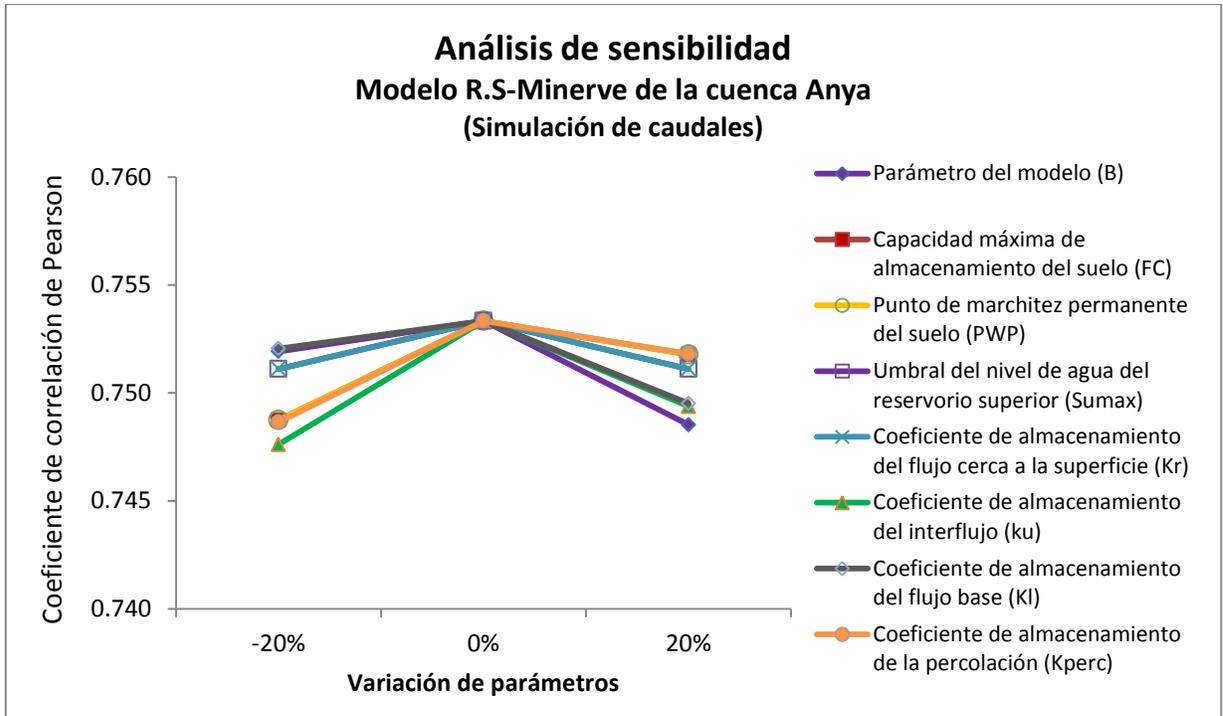


**Figura 123:** Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Colpar

### Análisis de sensibilidad de los caudales

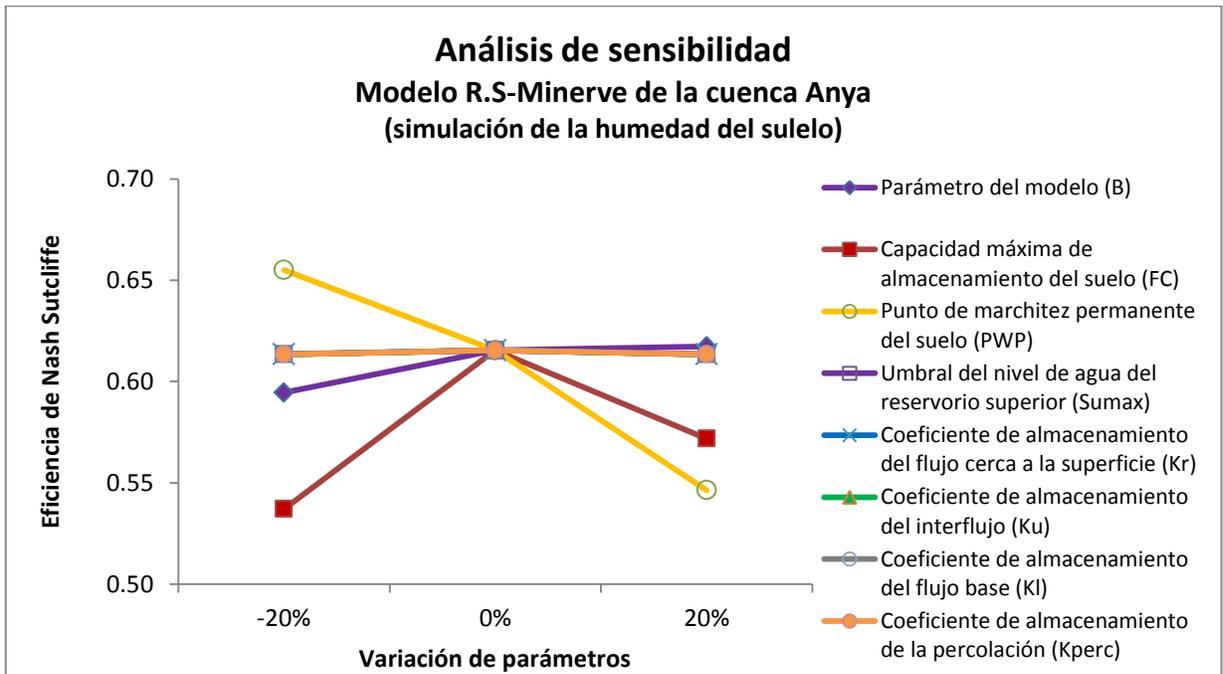


**Figura 124:** Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya, eficiencia de Nash Sutcliffe de los caudales

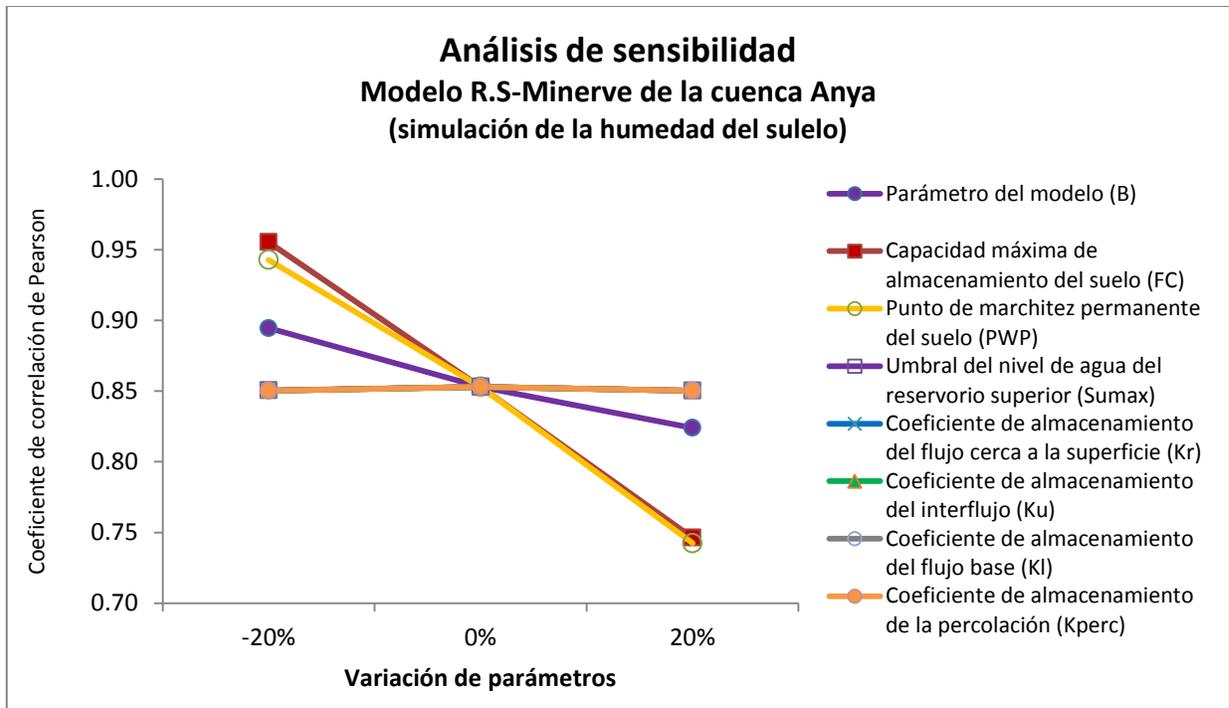


**Figura 125:** Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya, coeficiente de correlación de Pearson de los caudales

### Análisis de sensibilidad de la humedad del suelo

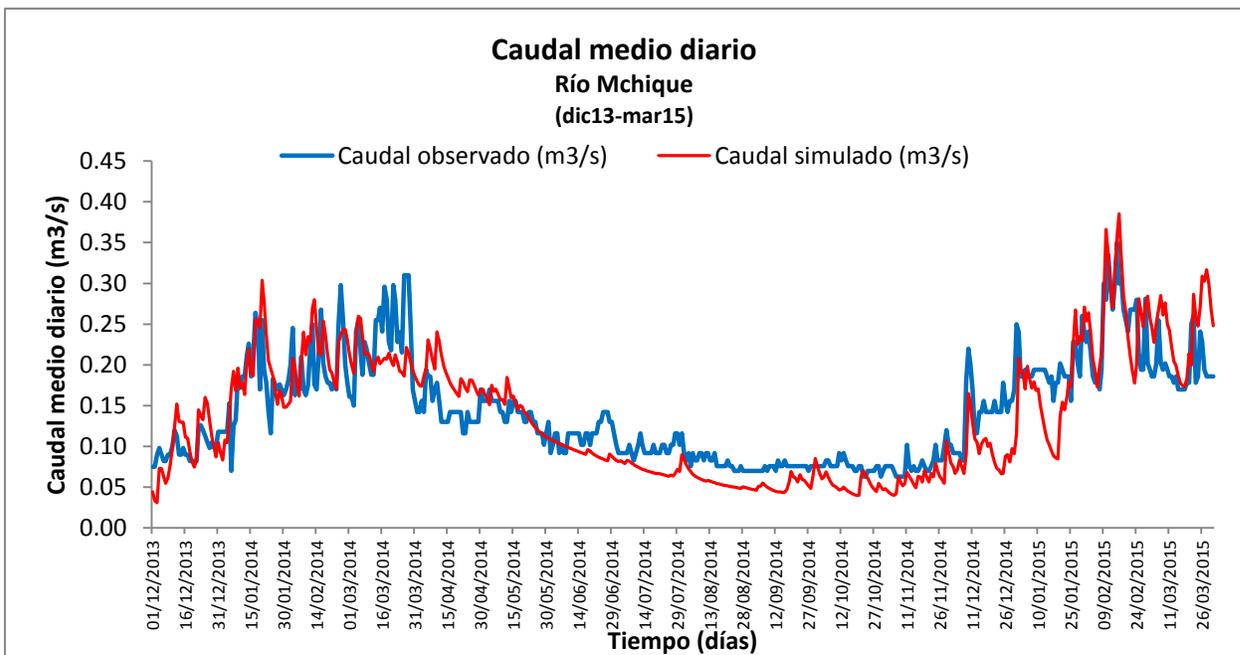


**Figura 126:** Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya, eficiencia de Nash Sutcliffe de la humedad del suelo

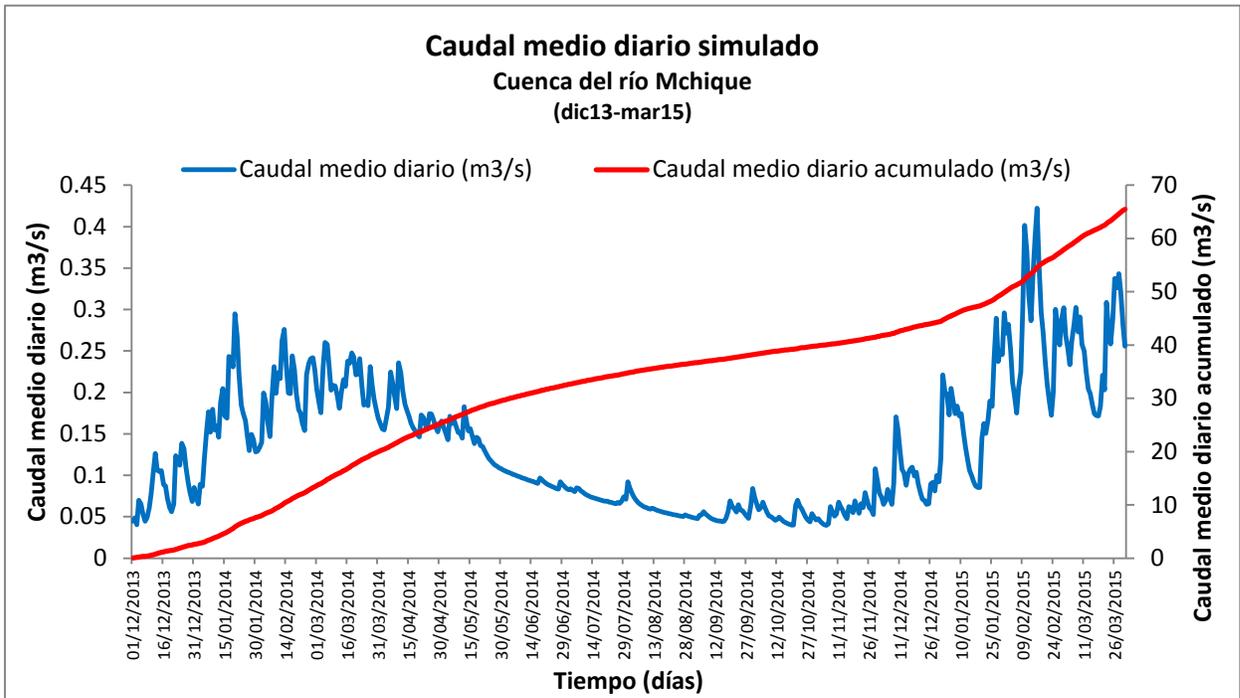


**Figura 127:** Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Anya, coeficiente de correlación de Pearson de la humedad del sulelo

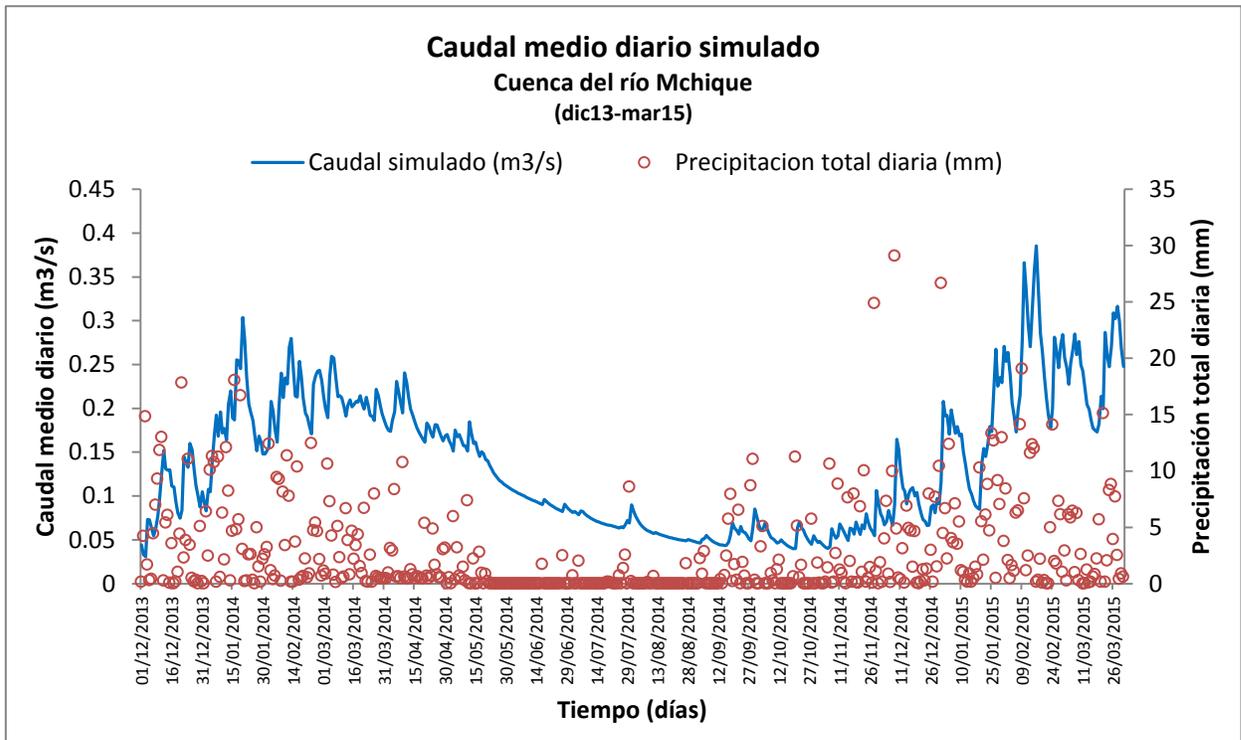
### b) Modelación de la cuenca Mchique



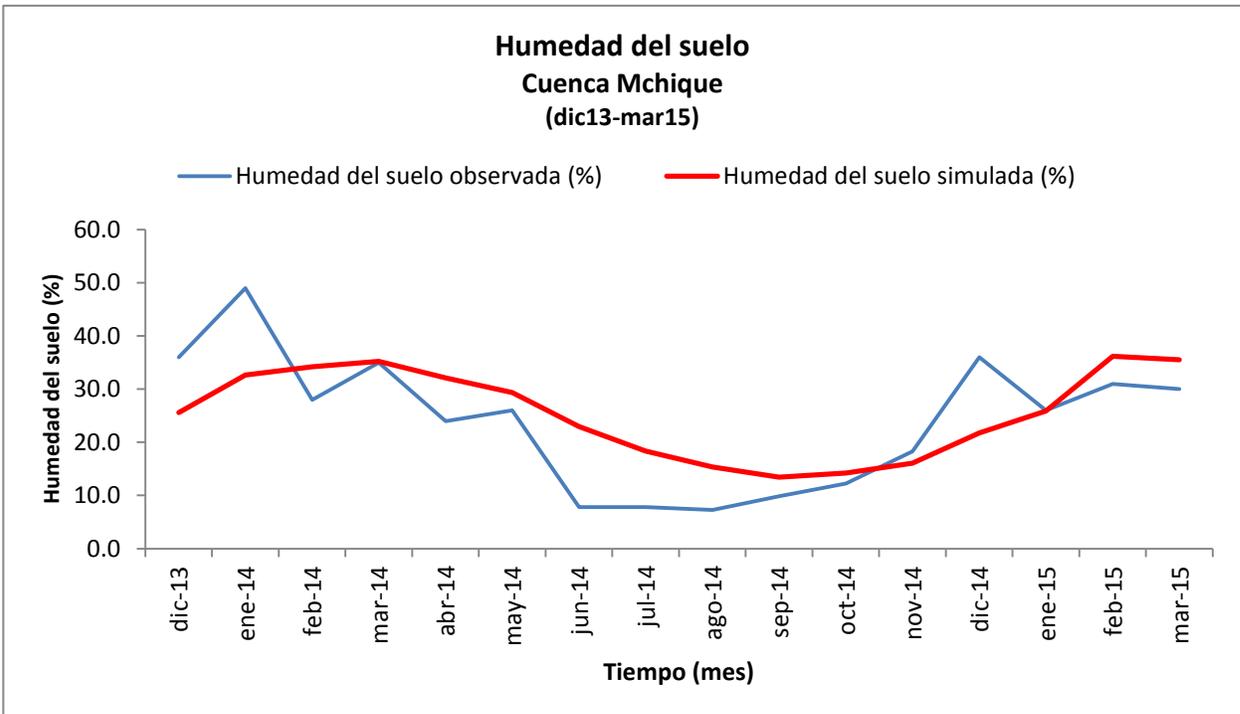
**Figura 128:** Caudales medios diarios observados y simulados del río Mchique, periodo dic13-mar15



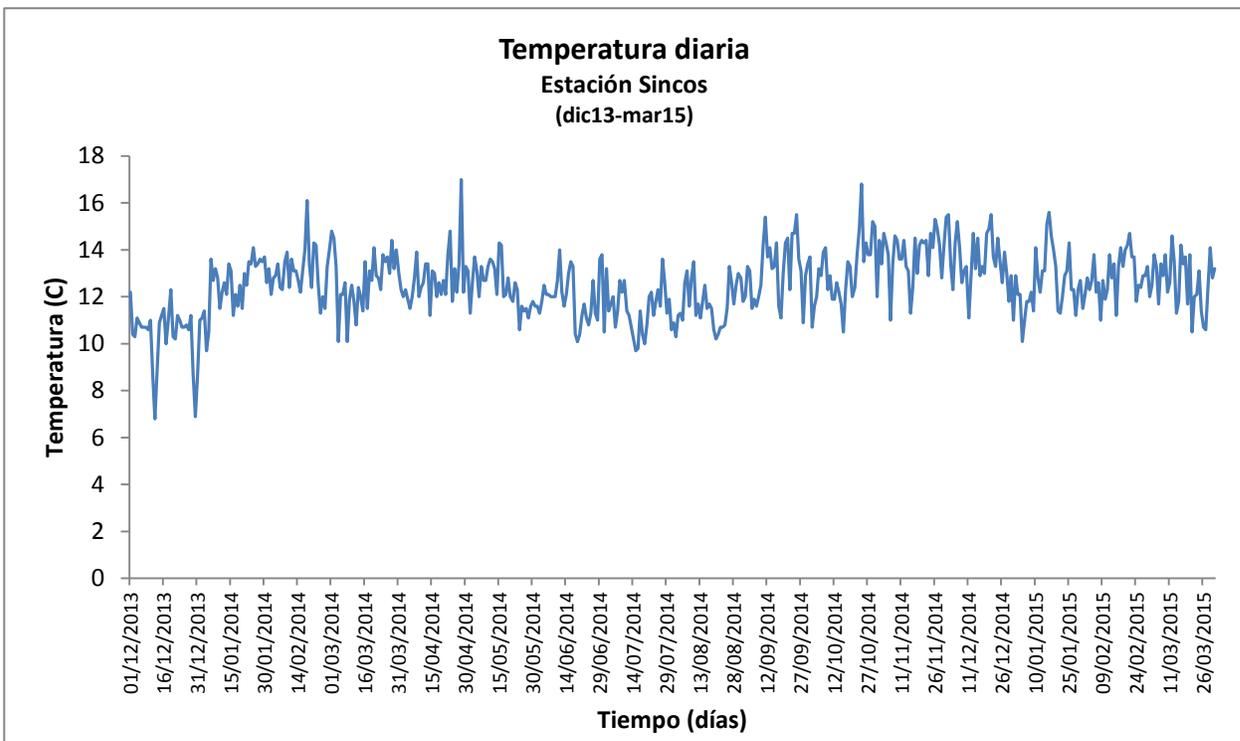
**Figura 130:** Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Mchique, periodo dic13-mar15



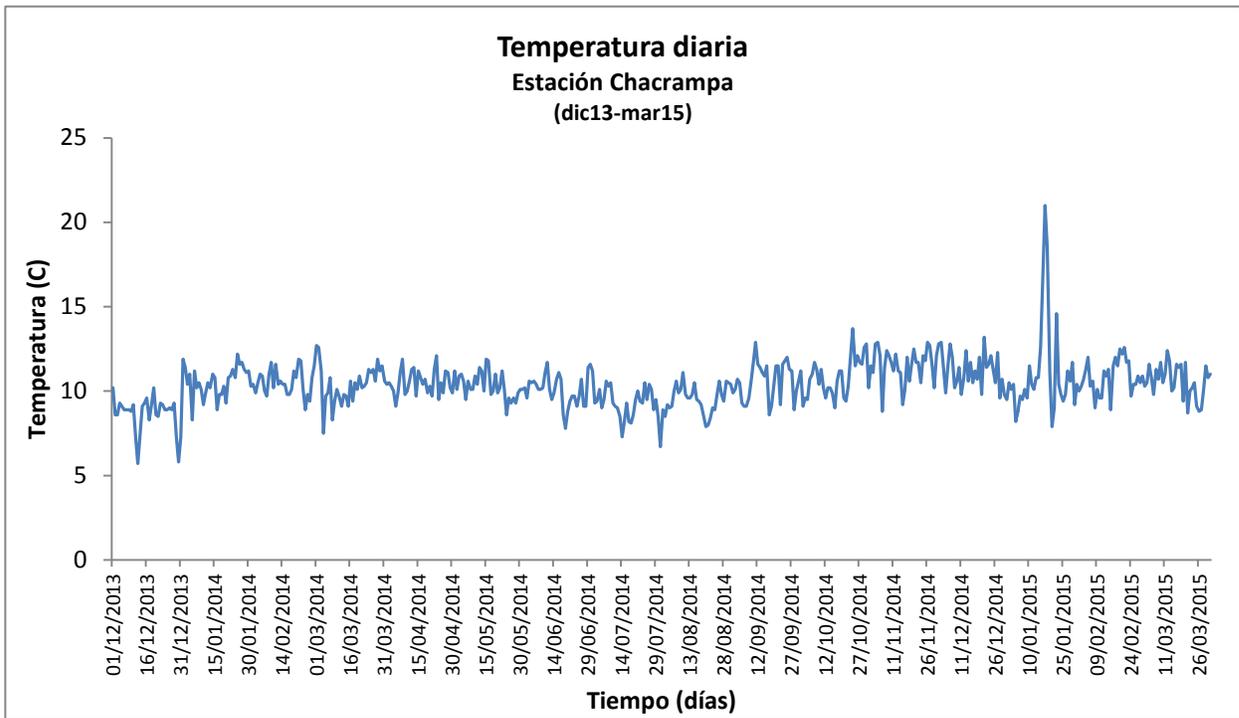
**Figura 129:** Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Mchique, periodo dic13-mar15



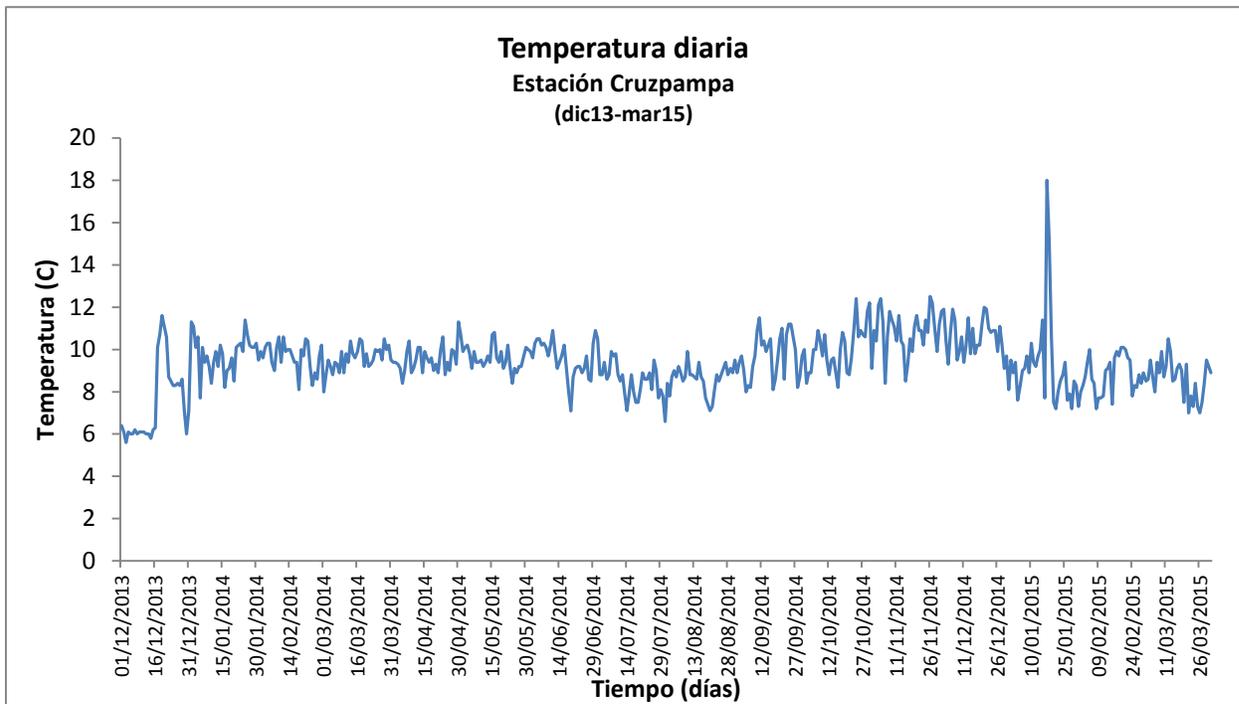
**Figura 131:** Humedad observada y simulada de la cuenca Mchique, periodo dic13-mar15



**Figura 132:** Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Sincos

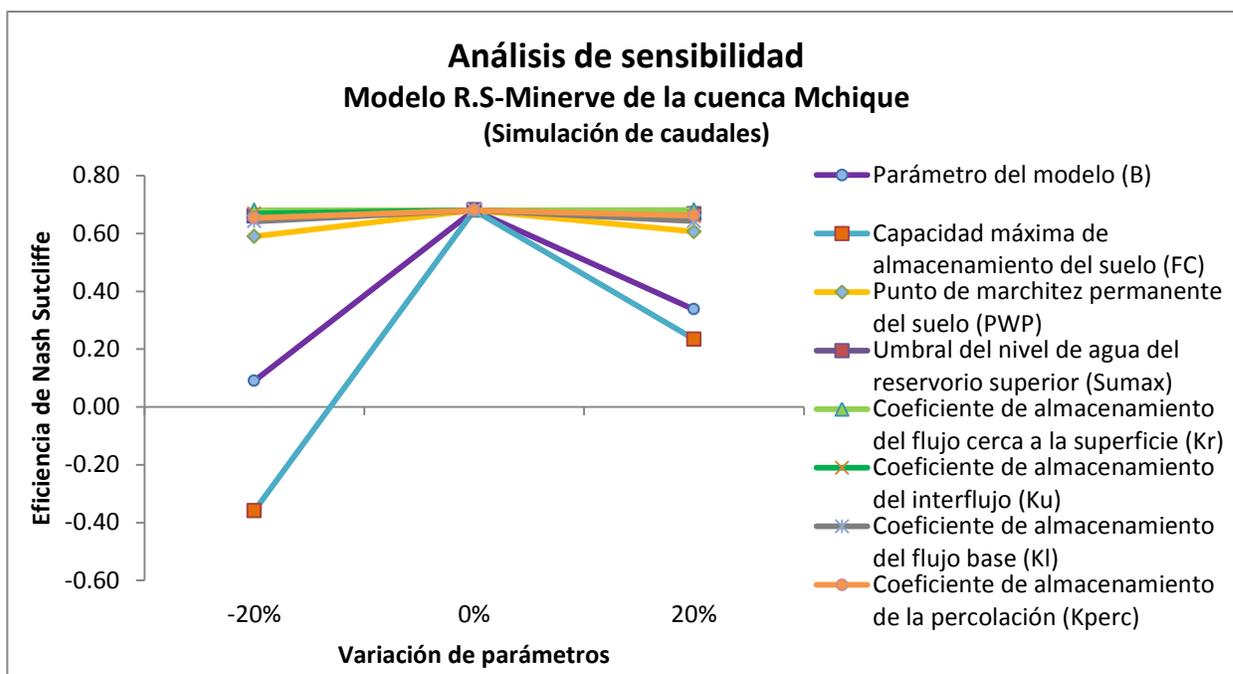


**Figura 133:** Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica chacarapa

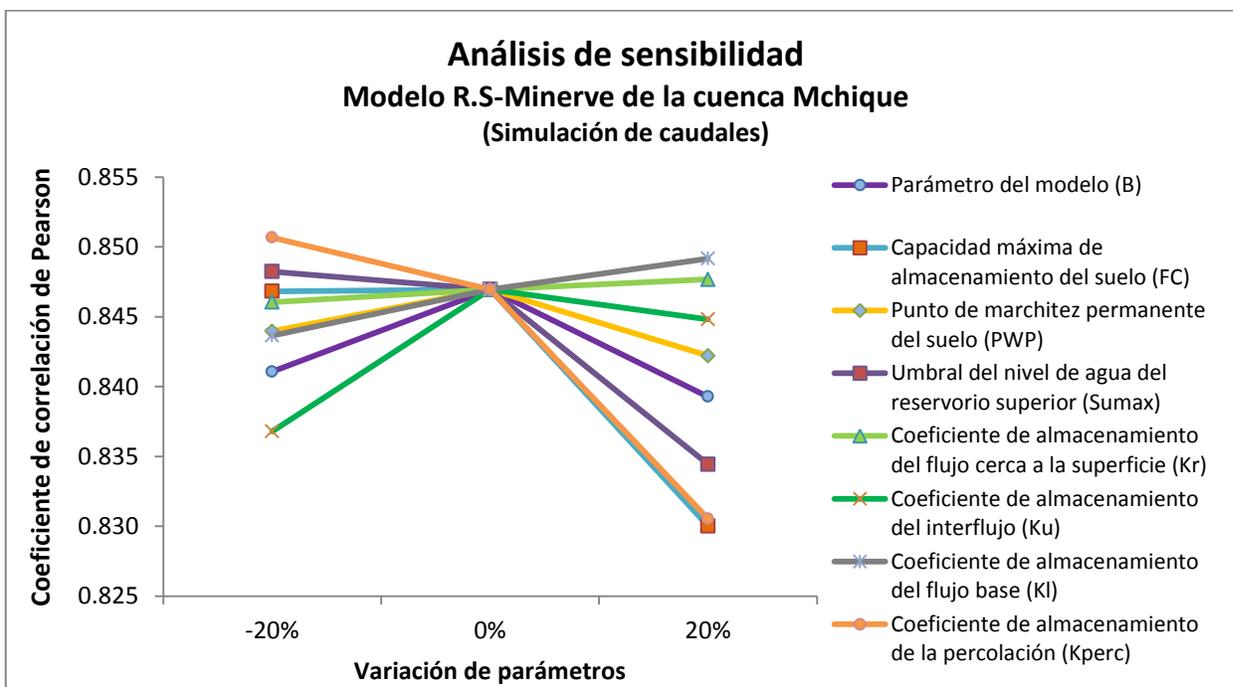


**Figura 134:** Serie de temperatura diaria (dic13-mar15), estación meteorológica Cruzpampa

### Análisis de sensibilidad de los caudales

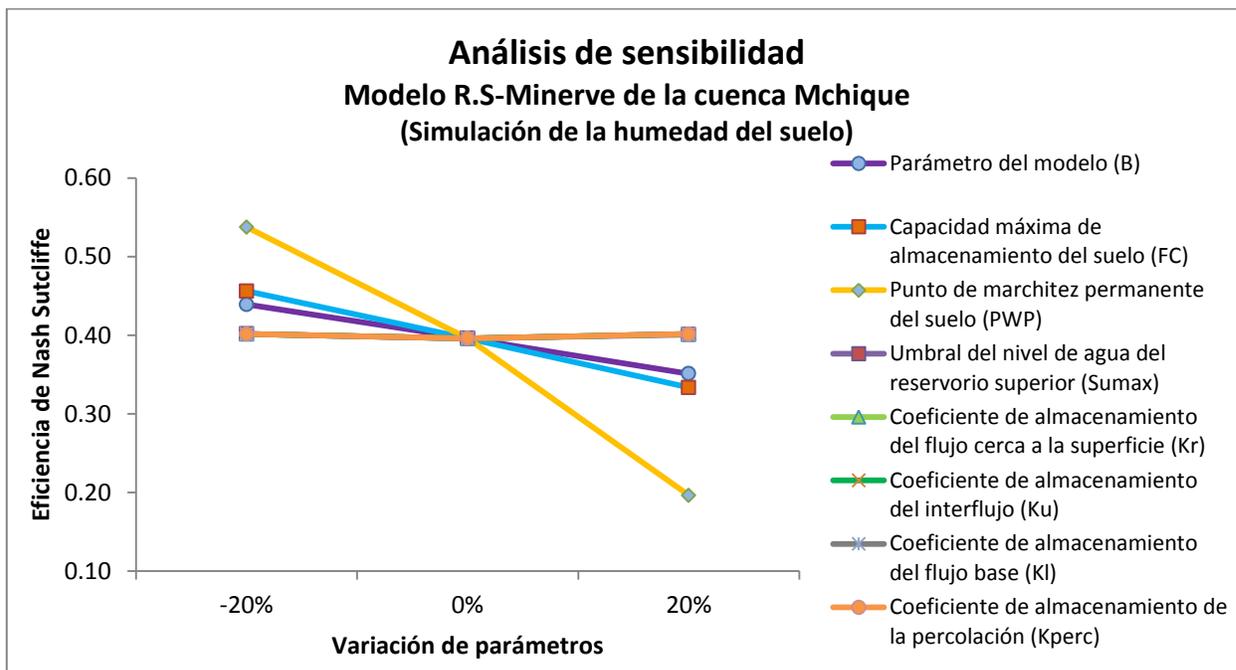


**Figura 135:** Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique, eficiencia de Nash Sutcliffe de los caudales

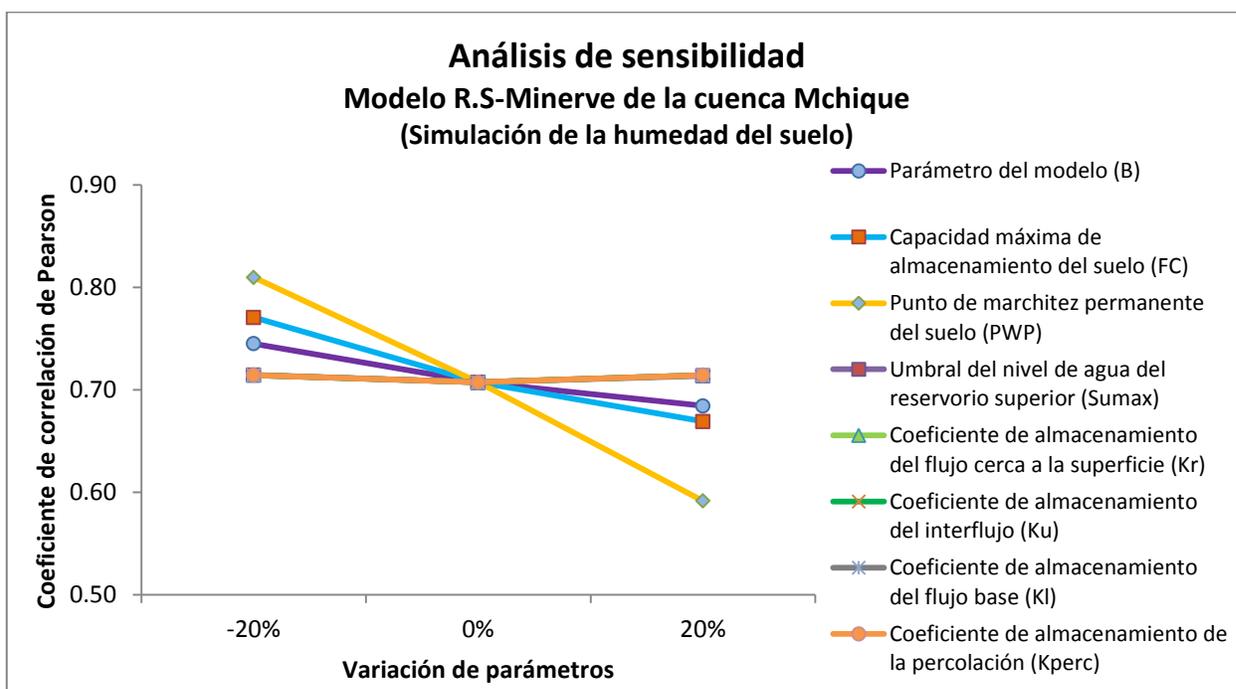


**Figura 136:** Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique, coeficiente de correlación de Pearson de los caudales

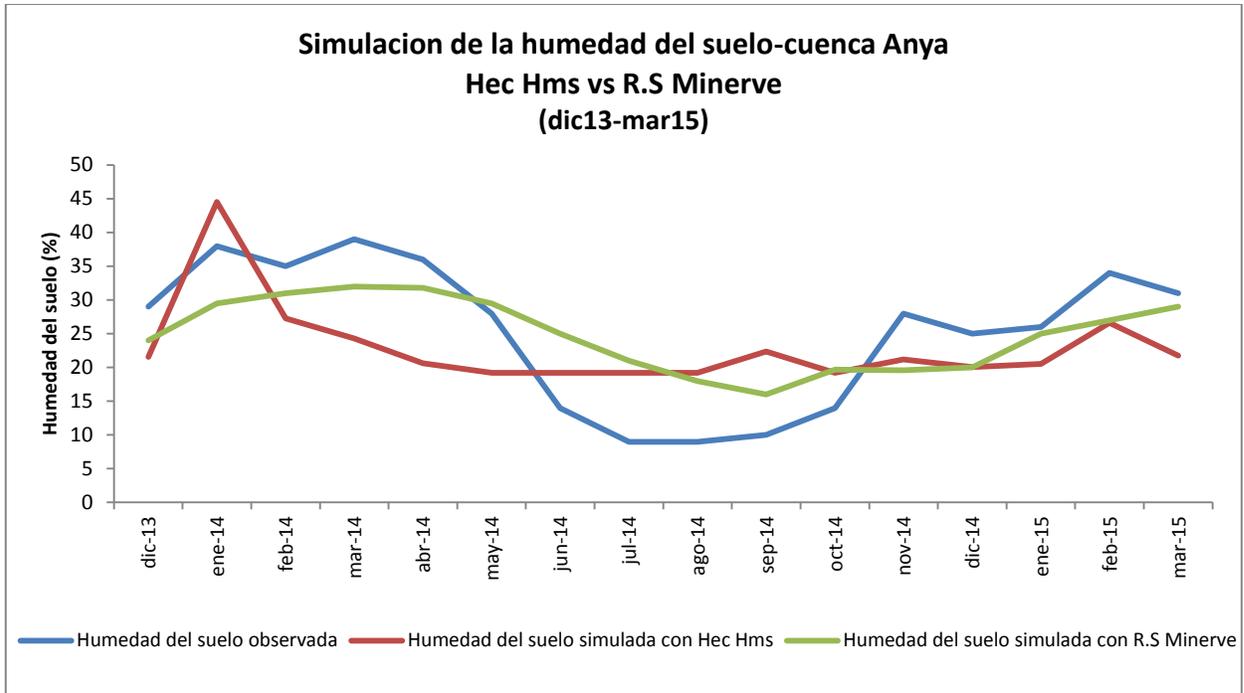
## Análisis de sensibilidad de la humedad del suelo



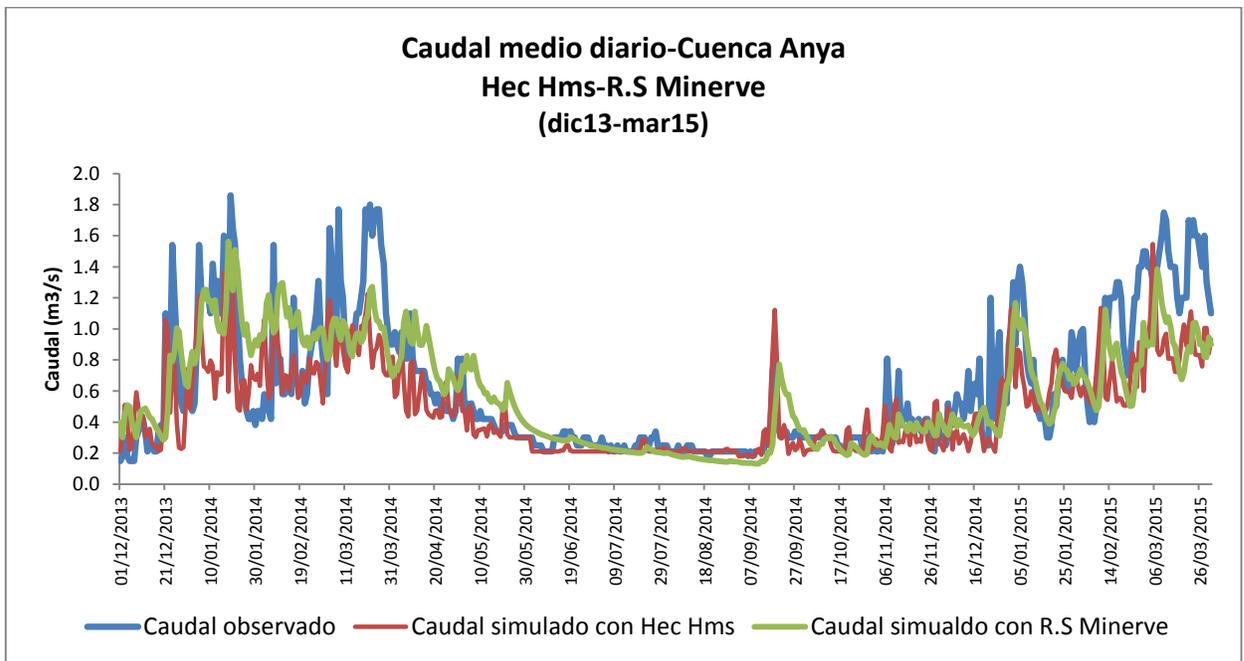
**Figura 137:** Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique, eficiencia de Nash Sutcliffe de la humedad del suelo



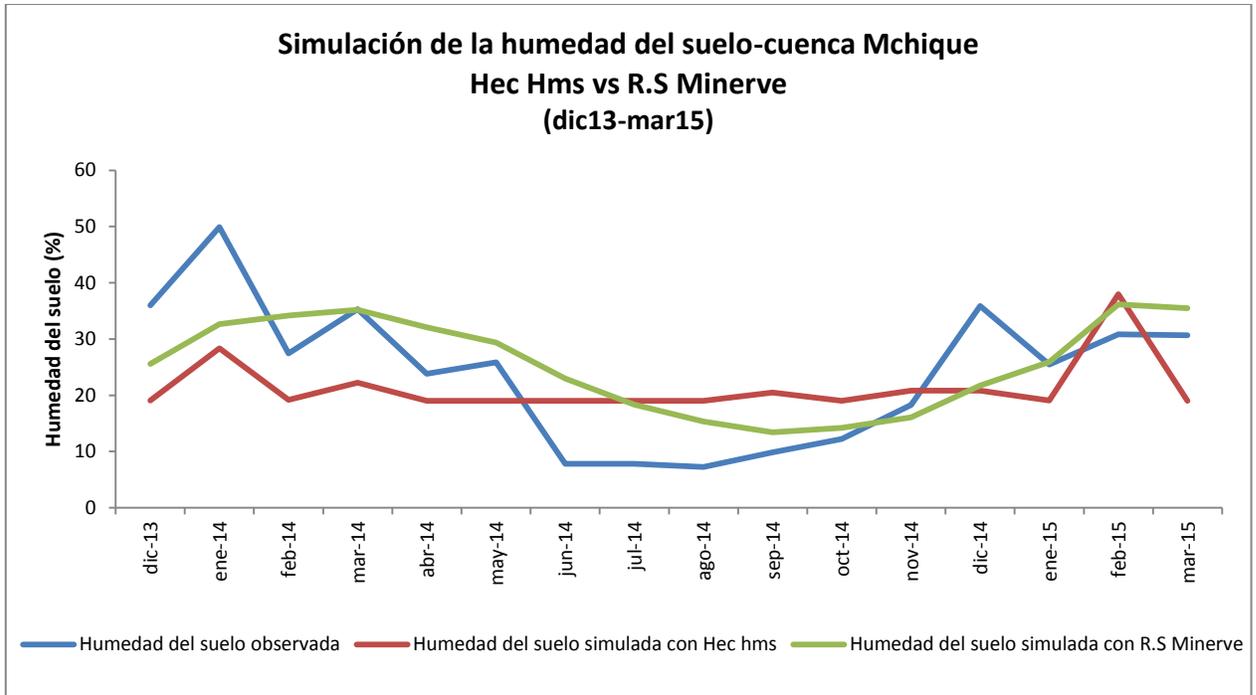
**Figura 138:** Sensibilidad de parámetros del modelo R.S-Minerve de la cuenca Mchique, coeficiente de correlación de Pearson de la humedad del suelo



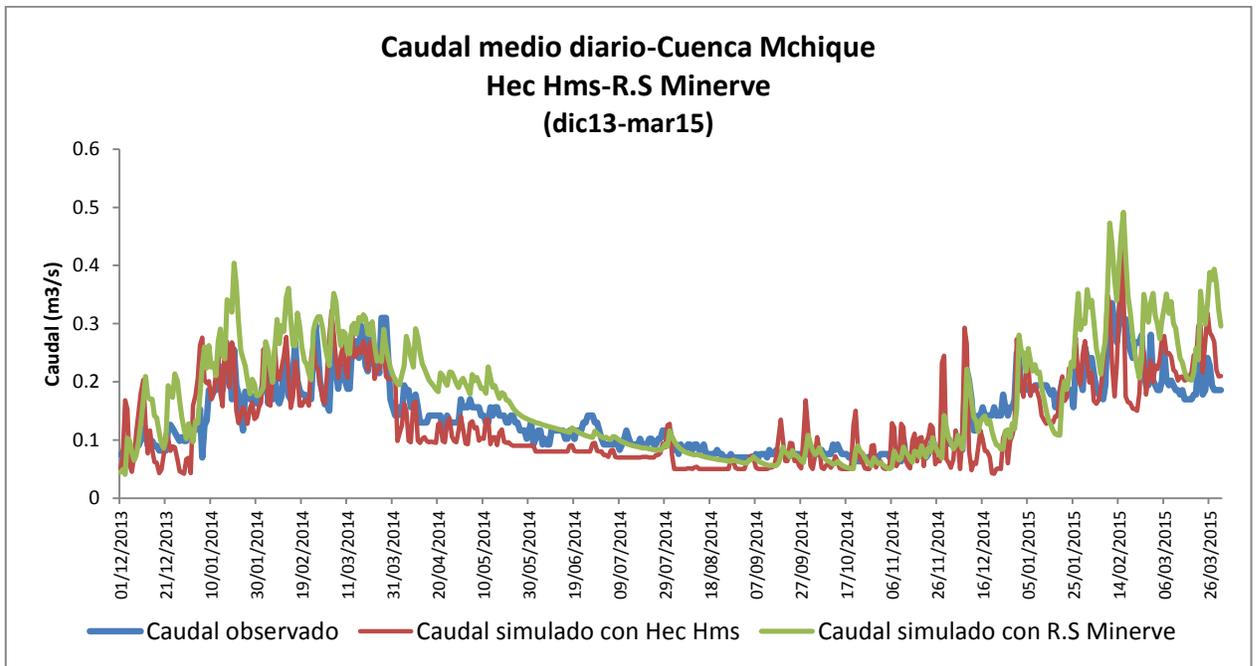
**Figura 139:** Simulación de la humedad del suelo de la cuenca Anya, comparación entre el Hec Hms y R.S Minerve



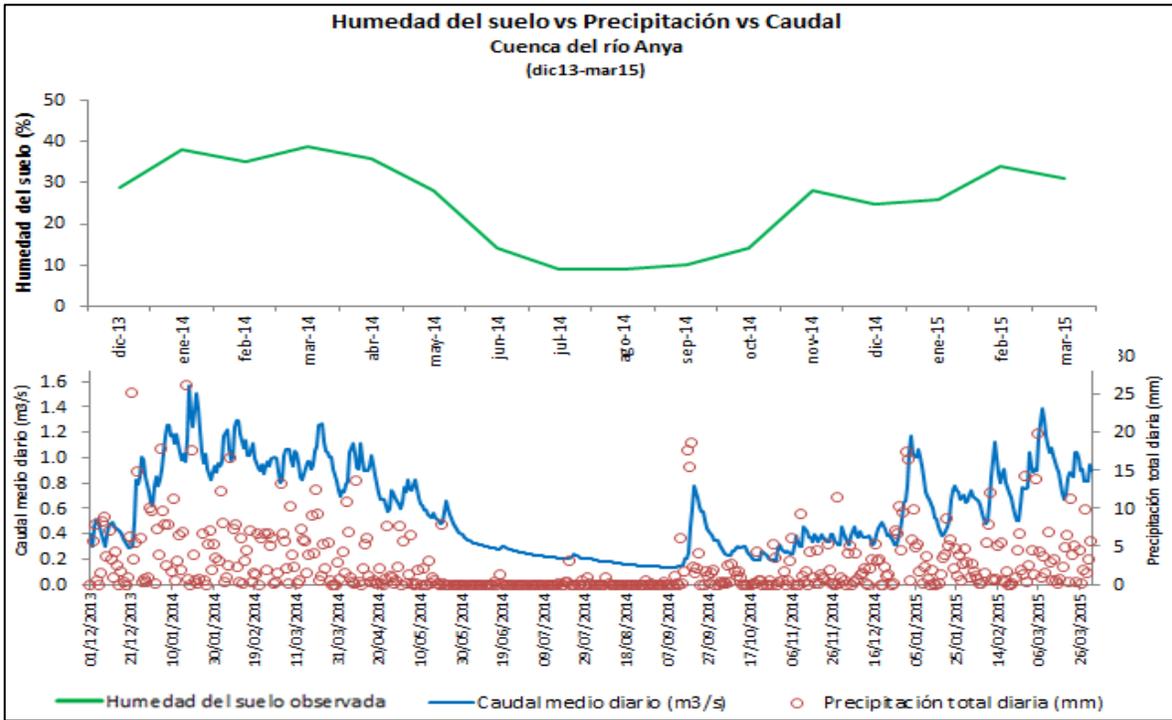
**Figura 140:** Simulación de los caudales medios diarios de la cuenca Anya, comparación entre el Hec Hms y R.S Minerve



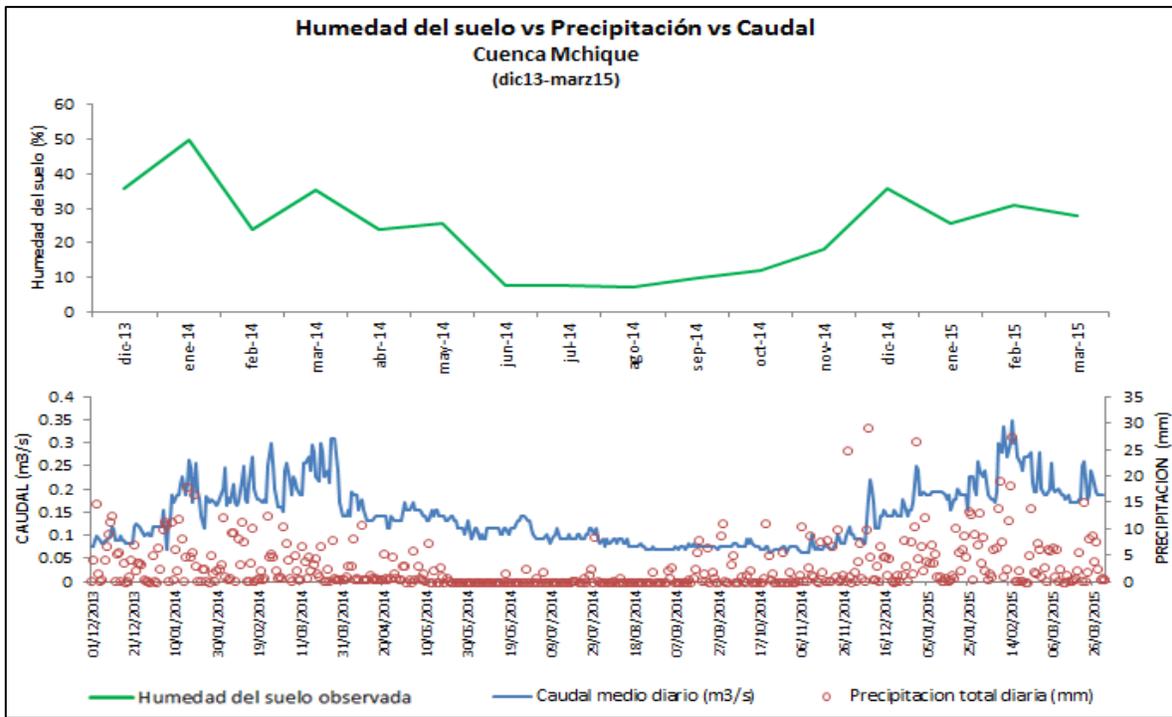
**Figura 141:** Simulación de la humedad del suelo de la cuenca Mchique, comparación entre el Hec Hms y R.S Minerve



**Figura 142:** Simulación de los caudales medios diarios de la cuenca Mchique, comparación entre el Hec Hms y R.S Minerve



**Figura 143:** Precipitación vs humedad del suelo observada vs caudales observados, de la cuenca Anya, periodo dic13-mar15



**Figura 144:** Precipitación vs humedad del suelo observada vs caudales observados, de la cuenca Mchique, periodo dic13-mar15

**Anexo 4: Panel fotográfico de actividades en campo**



**Foto1:** Estaciones pluviométricas y meteorológicas instaladas por el proyecto de Cooperación Belga VLIR/UOS-UNALM



**Foto 2:** Mecanismo Tipping bucket del pluviómetro RG3-M



**Foto 3:** Procedimiento de descarga de datos, estación pluviométrica Tambo



**Foto 3:** Procedimiento de descarga de datos de la consola de la estación meteorológica Chacrampa



**Foto 4:** Procedimiento de descarga de datos, estación pluviométrica Sincos



**Foto 5:** Mantenimiento de la estación meteorológica Davis modelo Vantage Pro2™ Plus



**Foto 6:** Calibración de las estaciones meteorológicas Davis modelo Vantage Pro2™ Plus, con una estación patrón



**Foto 7:** Procedimiento de aforo del río Anya



**Foto 8:** Procedimiento de aforo del río Mchique



**Foto 9:** Estación hidrométrica Anya



**Foto 10:** Limpieza del cauce del río Anya



**Foto 11:** Estación hidrométrica Mchique



**Foto 12:** Limpieza del cauce del río Mchique



**Foto 13:** Estación meteorológica Cruzpampa



**Foto 14:** Procedimiento de descarga de datos del equipo Diver del río Anya



**Foto 15:** Vista de la cuenca Anya en época húmeda



**Foto 16:** Vista de la cuenca Anya en época seca



**Foto 17:** Vista de la cuenca Mchique en época húmeda



**Foto 18:** Vista de la cuenca Mchique en época seca



**Foto 19:** Ubicación con GPS de los puntos de humedad de la cuenca Anya



**Foto 20:** Ubicación con GPS de los puntos de humedad de la cuenca Mchique



**Foto 21:** Medición de la humedad del suelo con el equipo TDR, en la cuenca Anya



**Foto 22:** Medición de la humedad del suelo con el equipo TDR, en la cuenca Mchique



**Foto 24:** Vista panorámica del distrito de Quilcas

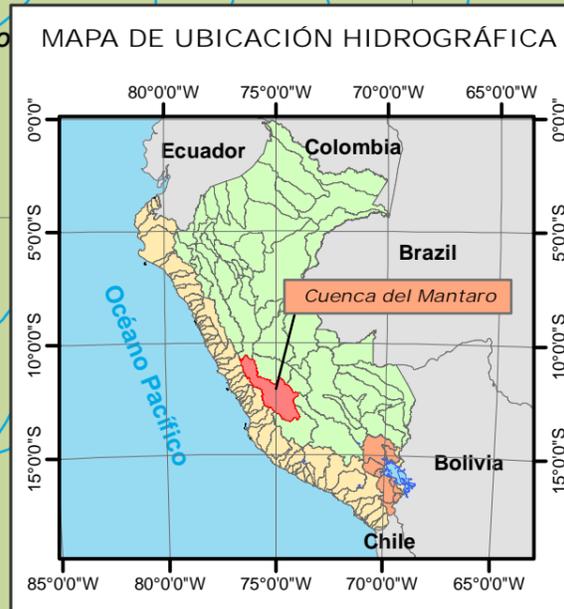
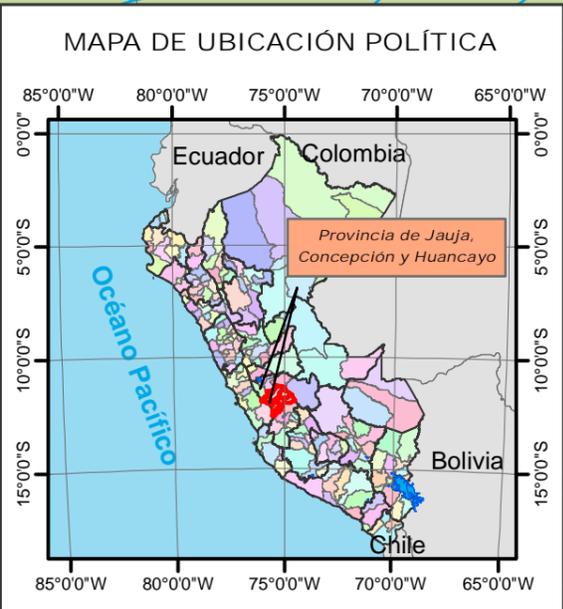
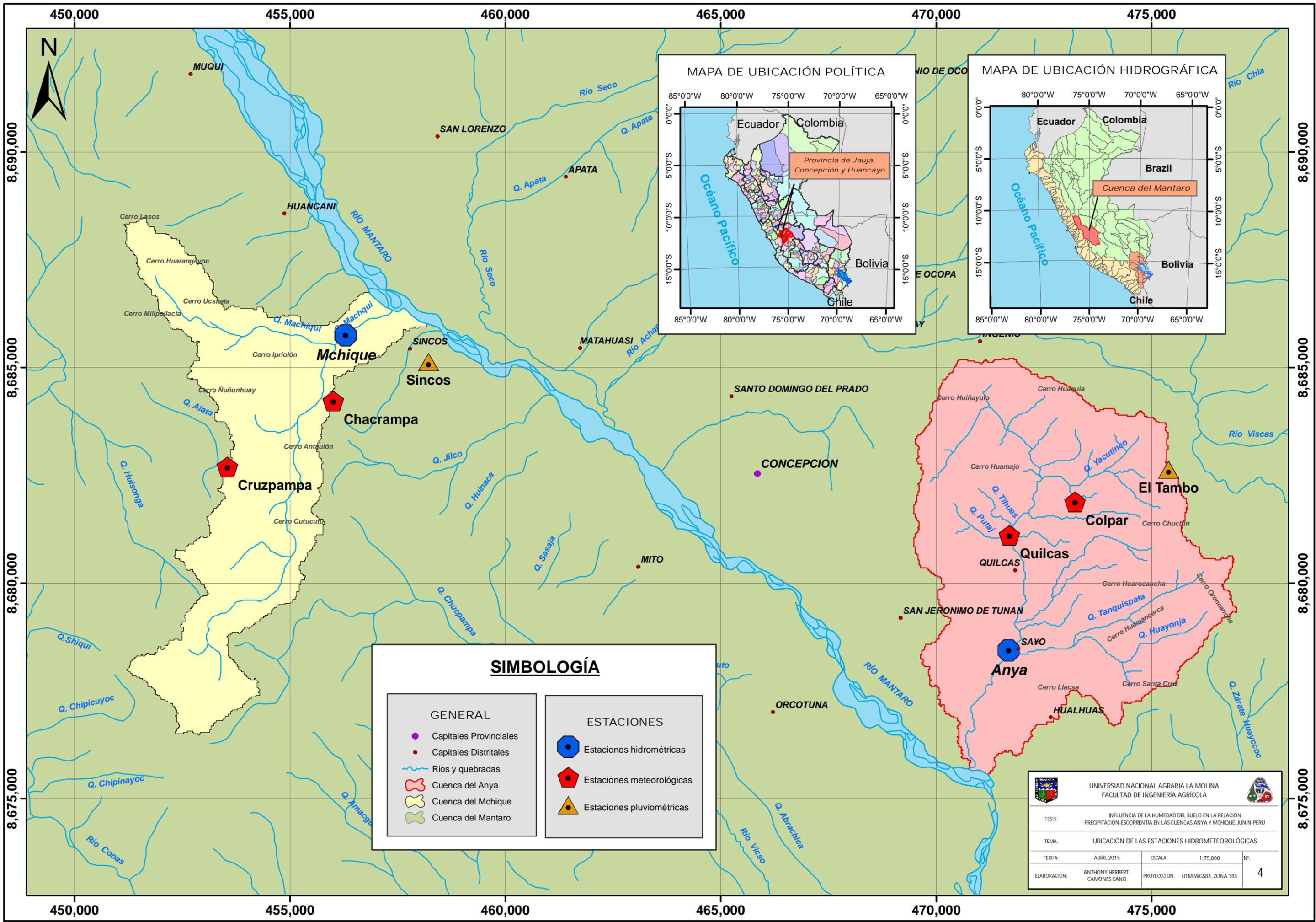


**Foto 25:** Vista panorámica del distrito de Sincos









**SIMBOLOGÍA**

GENERAL		ESTACIONES	
	Capitales Provinciales		Estaciones hidrométricas
	Capitales Distritales		Estaciones meteorológicas
	Ríos y quebradas		Estaciones pluviométricas
	Cuenca del Anya		
	Cuenca del Mchique		
	Cuenca del Mantaro		

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

TESIS: INFLUENCIA DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LA RELACION  
PRECIPITACIÓN-ESCORRENTIA EN LAS CUENCAS ANYA Y MCHIQUE, JUNÍN-PERÚ

TEMA: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS

FECHA: ABRIL 2015 ESCALA: 1:75,000 N°: 4

ELABORACIÓN: ANTHONY HERBERT CAMONES CANO PROYECCIÓN: UTM-WGS84, ZONA 18S