

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



“ESTUDIO DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE LAS  
CUENCAS DEL ANYA Y DEL MCHIQUE, DEPARTAMENTO DE  
JUNÍN - PERÚ”

Presentado por:

HAROLD OMAR LLAUCA SOTO

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA

Lima – Perú

2014

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**ESTUDIO DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL**

**DE LAS CUENCAS DEL ANYA Y DEL MCHIQUE,**

**DEPARTAMENTO DE JUNÍN - PERÚ**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**HAROLD OMAR LLAUCA SOTO**

---

**Ing. SEBASTIÁN SANTAYANA V.**  
**Presidente**

---

**Dr. EDUARDO CHAVARRI V.**  
**Patrocinador**

---

**Dra. LIA RAMOS F.**  
**Miembro**

---

**Ing. JERÓNIMO GARCÍA V.**  
**Miembro**

**LIMA - PERÚ**

**2014**

“A veces podemos pasarnos años sin vivir en absoluto, y de pronto toda nuestra vida se concentra en un solo instante.”

*Oscar Wilde.*

“Cuando un loco parece completamente sensato, es ya el momento de ponerle la camisa de fuerza.”

*Edgar Allan Poe.*

## **DEDICATORIA**

A mi familia, mis padres Manuel y Graciela, por su incondicional apoyo y su ejemplo de lucha, esfuerzo y dedicación.

A mis hermanos Dante y Shessira, por compartir junto a ellos aventuras inolvidables.

A mis abuelos, especialmente a mi querida abuela María, quién ese encuentra muy lejos pero siempre guía mis pasos.

## **AGRADECIMIENTO**

La presente investigación se llevó a cabo gracias al financiamiento del Proyecto de Cooperación Belga 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 al Dr. Eduardo Chávarri, por sus conocimientos compartidos, su guía para la realización de la presente tesis, y ser referencia para mi desarrollo profesional. Asimismo, a todo el equipo de trabajo del proyecto VLIR, especialmente a los señores (as): Angélica, Nicolás, Alejandro, Nilton, Soraida, Cecinio y Elvis; por los gratos momentos que compartimos durante estos últimos años, y por las experiencias ganadas que me ayudan a ser mejor ser humano.

## RESUMEN

La carencia de estudios técnicos en las cuencas Anya y Mchique (subcuencas del Mantaro) dificulta el desarrollo de la principal actividad económica de la zona: la agricultura. Debido a ello, esta investigación planteó la realización del balance hídrico actual y futuro de ambas cuencas mediante modelos hidrológicos. A fin de cumplir dicho objetivo, la información hidrometeorológica se obtuvo *in situ* a partir de las estaciones pluviométricas (*Tambo, Colpar, Sincos y Quero*), meteorológicas (*Quilcas, Cruzpampa, Chacrampa, Yanamucllo y Molinos*) e hidrométricas (*Anya y Mchique*), previamente instaladas. De igual forma, la inspección de campo de ambas cuencas permitió identificar las demandas hídricas.

La oferta hídrica se determinó a partir de la simulación de los caudales diarios, mediante la calibración y validación del modelo determinístico Hec-HMS (haciendo uso del modelo de pérdidas *soil moisture accounting*). Por otro lado, la determinación de las demandas hídricas diarias involucró la estimación de la demanda agrícola, en base a la elaboración de las respectivas cédulas de cultivo; así como, la estimación de las demandas poblacionales, pecuarias y ecológicas. Adicionalmente, se realizaron actividades complementarias como el inventario de las fuentes de agua superficial y encuestas sobre la problemática de los recursos hídricos.

Finalmente, el uso del modelo MODSIM facilitó la determinación del balance hídrico actual para las cuencas Anya y Mchique (diciembre 2011- junio 2013), cuyos resultados permitieron identificar días bajo déficit y superávit hídrico. Asimismo, se analizaron 04 escenarios futuros para las cuencas Anya y Mchique: escenario I (a corto plazo: 2017), escenario II (a mediano plazo: 2022), y escenarios III y IV (a largo plazo: 2050); los cuales consideraron la incorporación al riego de las actuales áreas en secano, el incremento de la actual eficiencia de riego y la demanda hídrica, así como la disminución de la precipitación por efectos del cambio climático.

*Palabras clave: Balance hídrico, HEC-HMS, oferta hídrica, demanda hídrica, escenarios.*

## ABSTRACT

The shortage of water technical studies about Anya and Mchique watersheds (subbasins of the Mantaro River) makes difficult the development of whose main economic activity: agriculture. For this reason, this investigation propounded to make the current and future water balance of both watersheds through hydrological models; in order to accomplish that objective, hydrometeorological information were obtained *in situ* from pluviometric stations (*Tambo, Colpar, Sincos and Quero*), meteorological stations (*Quilcas, Cruzpampa, Chacrampa, Yanamucllo and Molinos*) and hydrometric stations (*Anya and Mchique*) which were installed previously. In the same way, the field inspection of both basins allowed to identify water demands.

The water resource available was determined from simulation of daily streamflows, through calibration and validation of deterministic model Hec-HMS (making use of the soil moisture accounting loss model). On the other hand, the determination of daily water demands considered the estimation of agriculture water requirements, based on the elaboration of crop schedules; as well as, the estimation of population, livestock and ecological demands. Additionally, field activities such as: the inventory of surface water resources and doing polls about water resources problems; were done to complement this research.

Finally, the use of MODSIM model facilitated the calculation of current water balances for Anya and Mchique watersheds (december 2011 – june 2013), whose results allowed to identify days of water deficit and water surplus. Furthermore, 04 future scenarios for Anya and Mchique watersheds were analyzed: scenario I (short-term: 2017), scenario II (medium-term: 2022), and scenarios III and IV (long-term: 2050); considering the incorporation to irrigation from current rainfed areas, the increasing of the current water irrigation efficiency and the water demand, as well as the decreasing of rainfall due to climate change.

*Keywords: Water balance, HEC-HMS, water resource available, water demand, scenarios.*

## RÉSUMÉ

L'absence d'études techniques sur les bassins versants Anya et Mchique (sous-bassins versant du Mantaro) rend difficile le développement de l'activité économique principale de la zone : l'agriculture. En conséquence, cette recherche a proposé la mise en place d'un bilan hydrologique actuel et future sur ces deux bassins versants par l'intermédiaire de modèles hydrologiques. Pour ce faire, l'information a été obtenue in situ des stations pluviométriques (Tambo, Colpar, Sincos et Quero), des stations météorologiques (Quilcas, Cruzpampa, Chacrampa, Yanamucllo et Molinos) et des stations hydrométriques (Anya et Mchique), auparavant installées. De même, l'inspection sur pied de ces deux bassins versants a permis d'identifier les besoins en eau.

L'approvisionnement en eau a été déterminé par la simulation des débits quotidiens à l'aide du calibrage et du validation du modèle déterministique HEC-HMS (en s'appuyant sur le modèle de perte soil moisture accounting). En outre, la détermination des besoins quotidiens en eau a impliqué l'estimation du besoin de l'agriculture, basée en l'élaboration d'un respectif plan de rotation des cultures, et l'estimation des besoins en eau de la population, du bétail et de l'écologie. En plus, les activités complémentaires telles que la création d'un inventaire des sources d'eau de surface et la réalisation des enquêtes sur la problématique des ressources en eau ont été effectuées.

Finalement, l'utilisation du modèle MODSIM a rendu facile l'estimation du bilan hydrologique actuel pour les bassins versants Anya et Mchique (Décembre 2011 - Juin 2013), les résultats ont permis d'identifier jours de déficit et d'excédent hydrique. De la même manière, quatre futures scénarios pour les bassins versant Anya et Mchique ont été analysés: scénario I (à court terme : 2017), scénario II (à moyen terme : 2022), scénario III et IV (à long terme : 2050) ; en considérant l'irrigation des zones non-irriguées, la croissance de l'efficacité de l'irrigation et des besoins en eau, et la diminution des précipitations en raison des effets du changement climatique.

*Mots clés: Bilan hydrologique, HEC-HMS, approvisionnement en eau, besoin en eau, scénario*



## ÍNDICE GENERAL

	<i>Pág.</i>
TÍTULO .....	i
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	viii
RÉSUMÉ .....	ix
ÍNDICE GENERAL .....	x
TABLAS .....	xiii
CUADROS .....	xiv
FIGURAS .....	xvii
ANEXOS .....	xxv
FOTOGRAFÍAS .....	xxvii
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS.....	3
<b>II. REVISIÓN DE LA LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
2.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS.....	4
2.1.1. Objetivos .....	4
2.1.2. Etapas .....	5
2.1.3. Preparación de datos.....	5
2.2. PLUVIOMETRÍA .....	6
2.2.1. Densidad de estaciones pluviométricas.....	6
2.2.2. Pluviómetros de registro continuo.....	7
2.2.3. Precipitación total diaria.....	8
2.2.4. Análisis de componentes principales .....	9
2.3. HIDROMETRÍA .....	11

2.3.1.	Relación nivel-caudal.....	11
2.3.2.	Caudal medio diario .....	12
2.3.3.	Proceso de aforo con correntómetro.....	12
2.3.4.	Métodos de estimación de la velocidad media.....	14
2.3.5.	Cálculo del caudal aforado.....	15
2.3.6.	Curva de duración de caudales.....	17
2.4.	ESTUDIO DE BALANCE HÍDRICO .....	17
2.4.1.	Ecuación del balance hídrico de una cuenca.....	18
2.4.2.	Balance hídrico diario .....	19
2.4.3.	Caudal ecológico .....	19
2.4.4.	Modelos de gestión.....	22
2.5.	MODELO HIDROLÓGICO .....	27
2.5.1.	Modelamiento determinístico.....	27
2.5.2.	Calibración del modelo .....	28
2.5.3.	Validación del modelo .....	31
2.5.4.	Modelo hidrológico Hec-HMS.....	32
2.6.	RESUMEN DE ESTUDIOS REALIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	34
2.6.1.	Geología y suelos .....	34
2.6.2.	Cobertura y uso de suelo .....	35
2.6.3.	Clima .....	36
2.6.4.	Ecología.....	36
2.6.5.	Máximas avenidas de los ríos Anya y Mchique.....	37
2.6.6.	Aspecto socio-económico .....	37
2.6.7.	Escenarios climáticos futuros en la cuenca del Mantaro.....	38
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
3.1.	MATERIALES .....	39
3.1.1.	Descripción de la zona de estudio .....	39
3.1.2.	Información cartográfica .....	41
3.1.3.	Información geológica.....	41
3.1.4.	Información meteorológica .....	42
3.1.5.	Información hidrométrica.....	43
3.1.6.	Materiales, equipos y programas de cómputo.....	44
3.2.	MÉTODOS .....	50

3.2.1. Descripción del comportamiento de la precipitación total diaria y caudales medios diarios .....	50
3.2.2. Determinación del balance hídrico.....	73
3.2.3. Simulación del comportamiento hidrológico de las cuencas .....	84
3.2.4. Descripción de la percepción sobre la problemática de los recursos hídricos	105
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>107</b>
4.1. DE LA DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN TOTAL DIARIA Y CAUDALES MEDIOS DIARIOS .....	107
4.1.1. Del análisis cartográfico y exploratorio de la información .....	107
4.1.2. De la hidrometeorología.....	113
4.2. DE LA DETERMINACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO .....	119
4.2.1. Oferta hídrica.....	119
4.2.2. Demanda hídrica .....	120
4.2.3. Balance hídrico en situación actual .....	123
4.3. DE LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS.....	124
4.3.1. Del modelo hidrológico.....	124
4.3.2. De los escenarios futuros.....	128
4.4. DE LA DESCRIPCIÓN DE LA PERCEPCIÓN SOBRE LA PROBLEMÁTICA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....	137
4.4.1. Encuestas a la población .....	137
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>139</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>141</b>
<b>VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>143</b>
<b>VIII.ANEXOS .....</b>	<b>148</b>

## TABLAS

	<i>Pág.</i>
Tabla 1: Técnicas para el análisis exploratorio de datos .....	6
Tabla 2: Valores mínimos recomendados de densidad de estaciones .....	7
Tabla 3: Densidad de estaciones pluviométricas recomendadas .....	7
Tabla 4: Métodos para la estimación del caudal ecológico .....	21
Tabla 5: Cambios porcentuales en precipitación al 2050, estimados para diferentes regiones de la cuenca Mantaro .....	38
Tabla 6: Interpretación del Índice KMO .....	67
Tabla 7: Población de los distritos de Quilcas y Saño .....	78
Tabla 8: Población del distrito de Sincos .....	79
Tabla 9: Población pecuaria de la cuenca Anya .....	80
Tabla 10: Población pecuaria de la cuenca Mchique .....	81
Tabla 11: Sub-zonas de almacenamiento del perfil del suelo, modelo Soil Moisture Accounting .....	90
Tabla 12: Parámetros a ser calibrados, submodelo de pérdidas de Hec-HMS .....	98

## CUADROS

	<i>Pág.</i>
Cuadro 1: Ubicación política de las cuencas Anya y Mchique .....	39
Cuadro 2: Ubicación de estaciones meteorológicas en la cuenca Anya .....	42
Cuadro 3: Ubicación de estaciones meteorológicas en la cuenca Mchique .....	42
Cuadro 4: Ubicación de estaciones meteorológicas complementarias .....	43
Cuadro 5: Ubicación de estaciones hidrométricas en las cuencas en estudio .....	43
Cuadro 6: Ubicación de equipos diver en las cuencas en estudio .....	44
Cuadro 7: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Anya .....	85
Cuadro 8: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Mchique .....	85
Cuadro 9: Variables consideradas en el Escenario I de las cuencas Anya y Mchique .....	103
Cuadro 10: Variables consideradas en el Escenario II de las cuencas Anya y Mchique ..	104
Cuadro 11: Variables consideradas en el Escenario III de las cuencas Anya y Mchique .	104
Cuadro 12: Variables consideradas en el Escenario IV de las cuencas Anya y Mchique .	105
Cuadro 13: Parámetros geomorfológicos de las cuencas Anya y Mchique .....	109
Cuadro 14: Estadísticas descriptivas de las series de precipitación diaria (diciembre 2011 – junio 2013).....	110
Cuadro 15: Estadísticas descriptivas de las series de precipitación diaria, estaciones complementarias (enero 2012 - diciembre 2012) .....	111
Cuadro 16: Estadísticas descriptivas de las series de caudales diarios (diciembre 2013 – junio 2013).....	112
Cuadro 17: Estadísticas descriptivas de las series de evapotranspiración de referencia diaria (diciembre 2011 – junio 2013) .....	113
Cuadro 18: Variación espacial de la media y varianza de la precipitación diaria del 2012 .....	114
Cuadro 19: Matriz de correlaciones (r) de la precipitación total diaria del 2012 .....	115
Cuadro 20: Test de esfericidad de Bartlett y KMO .....	115
Cuadro 21: Valores y vectores propios de la matriz de correlaciones.....	116

Cuadro 22: Matriz de componentes principales de la precipitación diaria del 2012.....	116
Cuadro 23: Valores y vectores propios (rotación <i>varimax</i> ).....	117
Cuadro 24: Matriz de componentes rotados de la precipitación diaria del 2012 .....	117
Cuadro 25: Área cultivada, en secano y bajo riego, en las cuencas Anya y Mchique .....	120
Cuadro 26: Porcentaje de área cultivada, en secano y bajo riego, en las cuencas Anya y Mchique.....	120
Cuadro 27: Población asentada en las cuencas Anya y Mchique.....	120
Cuadro 28: Cédula de cultivo, áreas bajo riego por gravedad en la cuenca Anya .....	121
Cuadro 29: Cédula de cultivo, áreas bajo riego por gravedad en la cuenca del Mchique.	122
Cuadro 30: Déficit y superávit hídrico, balance hídrico actual de la cuenca Anya (diciembre 2011 – junio 2013) .....	124
Cuadro 31: Déficit y superávit hídrico, balance hídrico actual de la cuenca Mchique (diciembre 2011 – junio 2013) .....	124
Cuadro 32: Estadísticos de bondad de ajuste, modelo hidrológico de la cuenca Anya.....	125
Cuadro 33: Parámetros calibrados del submodelo de pérdidas, modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Anya.....	126
Cuadro 34: Estadísticos de bondad de ajuste, modelo hidrológico de la cuenca Mchique	127
Cuadro 35: Parámetros calibrados del submodelo de pérdidas, modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Mchique .....	127
Cuadro 36: Cédula de cultivo de las actuales áreas en secano en la cuenca Anya.....	128
Cuadro 37: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario I de la cuenca Anya.....	129
Cuadro 38: Déficit y superávit hídrico del Escenario I de la cuenca Anya (2017) .....	129
Cuadro 39: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario II de la cuenca Anya.....	130
Cuadro 40: Déficit y superávit hídrico del Escenario II de la cuenca Anya (2022).....	130
Cuadro 41: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario III de la cuenca Anya .....	130
Cuadro 42: Déficit y superávit hídrico del Escenario III de la cuenca Anya (2050) .....	131
Cuadro 43: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario IV de la cuenca Anya .....	131
Cuadro 44: Déficit y superávit hídrico del Escenario IV de la cuenca Anya (2050) .....	131
Cuadro 45: Cédula de cultivo de las actuales áreas en secano en la cuenca Mchique.....	132

Cuadro 46: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario I de la cuenca Mchique.....	133
Cuadro 47: Déficit y superávit hídrico del Escenario I de la cuenca Mchique (2017).....	133
Cuadro 48: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario II de la cuenca Mchique.....	133
Cuadro 49: Déficit y superávit hídrico del Escenario II de cuenca Mchique (2022).....	134
Cuadro 50: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario III de la cuenca Mchique.....	134
Cuadro 51: Déficit y superávit hídrico del Escenario III de cuenca Mchique (2050).....	134
Cuadro 52: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario IV de la cuenca Mchique.....	135
Cuadro 53: Déficit y superávit hídrico del Escenario IV de cuenca Mchique (2050).....	135
Cuadro 54: Área incorporada al riego en las cuencas Anya y Mchique.....	136

## FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1: Mecanismo Tipping-Bucket (vista de perfil).....	8
Figura 2: Mecanismo Tipping-Bucket (vista de planta).....	8
Figura 3: Método de la sección media para el cálculo del caudal aforado.....	16
Figura 4: Contraste entre dos curvas de duración de caudales.....	17
Figura 5: Relación hipotética entre el incremento de caudales y la respuesta biológica.....	21
Figura 6: Estructura de la red MODSIM con nodos artificiales.....	25
Figura 7: Funcionabilidad y características de MODSIM.....	26
Figura 8: Exactitud y precisión en mediciones. Izquierda: grupo de medidas consideradas exactas. Derecha: grupo de medidas consideradas precisas.....	29
Figura 9: Efectos de las medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo.....	31
Figura 10: Cobertura y uso de suelo de la cuenca del Anya: (a) Población, (b) Pajonal, (c) Bosques y (d) Agrícola.....	35
Figura 11: Cobertura y uso de suelo de la cuenca del Mchique: (a) Agrícola, (b) Poblacional y (c) Pajonal.....	36
Figura 12: Ríos principales de las cuencas en estudio: (a) Río Mchique y (b) Río Anya...	37
Figura 13: Altimetría de la cuenca del río Anya.....	40
Figura 14: Altimetría de la cuenca del río Mchique.....	40
Figura 15: Correntómetro FP111.....	44
Figura 16: Estación minimeteorológica WatchDog 120.....	45
Figura 17: Estación pluviométrica RG3-M.....	46
Figura 18: Estación meteorológica Wireless Vantage Pro2™ Plus.....	47
Figura 19: Registrador automático Diver D501.....	48
Figura 20: Registrador automático Baro Diver.....	49
Figura 21: GPS Garmin MAPS 60Csx.....	49
Figura 22: Elementos del diagrama de cajas.....	58
Figura 23: Gráfico de histograma.....	59



Figura 24: Proceso de aforo volumétrico, inventario de la cuenca Anya .....	62
Figura 25: Proceso de aforo volumétrica, inventario de la cuenca Anya .....	62
Figura 26: Captación para uso poblacional, inventario de la cuenca Anya.....	63
Figura 27: Ilustración del nodo Flow Thru de MODSIM .....	83
Figura 28: Esquema hidráulico de la cuenca del río Anya .....	83
Figura 29: Esquema hidráulico de la cuenca del río Mchique .....	84
Figura 30: Polígonos de Thiessen.....	85
Figura 31: Relación entre el coeficiente de estrés hídrico y el contenido de humedad del suelo, modelo Soil Moisture Accounting .....	87
Figura 32: Esquema conceptual del módulo de HEC-HMS Soil Moisture Accounting .....	88
Figura 33: Relación entre la tasa de infiltración potencial y el contenido de humedad del suelo, modelo Soil Moisture Accounting .....	91
Figura 34: Algoritmo de incorporación de áreas en secano al riego .....	102
Figura 35: Curva hipsométrica de la cuenca del río Anya .....	148
Figura 36: Rectángulo equivalente de la cuenca del río Anya .....	148
Figura 37: Polígono de frecuencia de alturas de la cuenca del río Anya.....	149
Figura 38: Curva hipsométrica de la cuenca del río Mchique.....	149
Figura 39: Rectángulo equivalente de la cuenca del río Mchique.....	150
Figura 40: Polígono de frecuencia de alturas de la cuenca del río Mchique .....	150
Figura 41: Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Tambo .....	151
Figura 42: Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Colpar .....	151
Figura 43: Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Quilcas.....	152
Figura 44: Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Cruzpampa .....	152
Figura 45: Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Chacrampa.....	153
Figura 46: Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Sincos .....	153
Figura 47: Serie de precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Quero .....	154
Figura 48: Serie de precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Yanamucllo .....	154
Figura 49: Serie de precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Molinos.....	155
Figura 50: Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Tambo .	155
Figura 51: Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Colpar..	156
Figura 52: Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Quilcas	156
Figura 53: Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Cruzpampa .....	157

Figura 54: Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Chacrampa .....	157
Figura 55: Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Sincos..	158
Figura 56: Histograma de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Quero ..	158
Figura 57: Histograma de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Yanamuco .....	159
Figura 58: Histograma de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Molinos .....	159
Figura 59: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Tambo.....	160
Figura 60: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Colpar .....	160
Figura 61: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Quilcas.....	161
Figura 62: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Cruzpampa.....	161
Figura 63: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Chacrampa.....	162
Figura 64: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Sincos.....	162
Figura 65: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Quero .....	163
Figura 66: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Yanamuco.....	163
Figura 67: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Molinos.....	164
Figura 68: Serie del caudal medio diario (dic11 – jun13), estación Anya .....	164
Figura 69: Serie del caudal medio diario (dic11 – jun13), estación Mchique.....	165
Figura 70: Diagrama de cajas de los caudales medios diarios (dic11 – jun13), estación hidrométrica Anya .....	165
Figura 71: Diagrama de cajas de los caudales medios diarios (dic11 – jun13), estación hidrométrica Mchique.....	166
Figura 72: Valores atípicos de los caudales medios diarios (dic11 – jun13), estación hidrométrica Anya .....	166

Figura 73: Valores atípicos de los caudales medios diarios (dic11 – jun13), estación hidrométrica Mchique.....	167
Figura 74: Serie de evapotranspiración de referencia diaria (dic11 – jun13), estación meteorológica Quilcas .....	167
Figura 75: Serie de evapotranspiración de referencia diaria (dic11 – jun13), estación meteorológica Cruzpampa.....	168
Figura 76: Histograma de la evapotranspiración de referencia diaria (dic11 – jun13), estación meteorológica Quilcas .....	168
Figura 77: Histograma de la evapotranspiración de referencia diaria (dic11 – jun13), estación meteorológica Cruzpampa.....	169
Figura 78: Curva de duración de la precipitación total diaria en época seca (mayo-agosto), cuenca Anya .....	169
Figura 79: Curva de duración de la precipitación total diaria en época de lluvias (septiembre - abril), cuenca Anya.....	170
Figura 80: Curva de duración de la precipitación total diaria en época seca (mayo - agosto), cuenca Mchique.....	170
Figura 81: Curva de duración de la precipitación total diaria en época de lluvias (septiembre - abril), cuenca Mchique.....	171
Figura 82: Variación espacial de la media de la precipitación total diaria del 2012.....	171
Figura 83: Variación espacial de la varianza de la precipitación total diaria del 2012 .....	172
Figura 84: Matriz de correlaciones de la precipitación total diaria del 2012 .....	172
Figura 85: Gráfica de sedimentación de los componentes principales de la precipitación total diaria del 2012.....	173
Figura 86: Gráfica de puntuación de los días del primer y segundo componente principal de la precipitación total diaria del 2012 .....	173
Figura 87: Grafica de puntuación de las estaciones del primer y segundo componente principal de la precipitación total diaria del 2012 .....	174
Figura 88: Grafica de puntuación de los días de precipitación del primer y segundo componente rotado de la precipitación total diaria del 2012.....	174
Figura 89: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Tambo.....	175
Figura 90: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Colpar .....	175

Figura 91: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Quilcas.....	176
Figura 92: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Cruzpampa.....	176
Figura 93: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Chacrampa.....	177
Figura 94: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Sincos .....	177
Figura 95: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Yanamuco.....	178
Figura 96: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Molinos.....	178
Figura 97: Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Quero .....	179
Figura 98: Curva de calibración de la estación hidrométrica Anya, periodo dic11 – jun13 .....	179
Figura 99: Curva de calibración de la estación hidrométrica Mchique, periodo dic11 – jun13 .....	180
Figura 100: Sección típica del río Anya, estación hidrométrica Anya .....	180
Figura 101: Sección típica del río Mchique, estación hidrométrica Mchique.....	181
Figura 102: Curva de duración de caudales medios diarios del río Anya, periodo de estiaje (mayo - octubre) .....	181
Figura 103: Curva de duración de caudales medios diarios del río Anya, periodo de crecidas (noviembre - abril).....	182
Figura 104: Curva de duración de caudales medios diarios del río Mchique, periodo de estiaje (mayo - octubre) .....	182
Figura 105: Curva de duración de caudales medios diarios del río Mchique, periodo de crecidas (noviembre - abril).....	183
Figura 106: Cédula de cultivos bajo riego de la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13 .....	184
Figura 107: Cédula de cultivos bajo riego de la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13 .....	186
Figura 108: Series temporales de evapotranspiración de referencia, coeficiente del cultivo, evapotranspiración del cultivo, precipitación efectiva y demanda hídrica neta de áreas bajo riego en la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13 .....	188

Figura 109: Series temporales de evapotranspiración de referencia, coeficiente del cultivo, evapotranspiración del cultivo, precipitación efectiva y demanda hídrica neta de áreas bajo riego en la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13.....	189
Figura 110: Demanda hídrica actual de la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13.....	190
Figura 111: Demanda hídrica actual de la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13.....	190
Figura 112: Balance hídrico actual de la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13.....	191
Figura 113: Balance hídrico actual de la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13.....	191
Figura 114: Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic11 – jun13.....	192
Figura 115: Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Anya, periodo dic11 – jun13.....	192
Figura 116: Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13.....	193
Figura 117: Sensibilidad de parámetros del modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Anya, eficiencia de Nash Sutcliffe.....	193
Figura 118: Sensibilidad de parámetros del modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Anya, coeficiente de correlación de Pearson.....	194
Figura 119: Caudales medios diarios observados y simulados del río Mchique, periodo dic11 – jun13.....	194
Figura 120: Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Mchique, periodo dic11 – jun13.....	195
Figura 121: Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13.....	195
Figura 122: Sensibilidad de parámetros del modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Mchique, eficiencia de Nash Sutcliffe.....	196
Figura 123: Sensibilidad de parámetros del modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Mchique, coeficiente de correlación de Pearson.....	196
Figura 124: Esquema hidráulico del escenario I de la cuenca Anya (2017).....	197
Figura 125: Esquema hidráulico del escenario II de la cuenca Anya (2022).....	198
Figura 126: Esquema hidráulico del escenario III de la cuenca Anya (2050).....	199
Figura 127: Esquema hidráulico del escenario IV de la cuenca Anya (2050).....	200
Figura 128: Balance hídrico del escenario I de la cuenca Anya (2017).....	201
Figura 129: Balance hídrico del escenario II de la cuenca Anya (2022).....	201
Figura 130: Balance hídrico del escenario III de la cuenca Anya (2050).....	202

Figura 131: Balance hídrico del escenario IV de la cuenca Anya (2050) .....	202
Figura 132: Esquema hidráulico del escenario I de la cuenca Mchique (2017).....	203
Figura 133: Esquema hidráulico del escenario II de la cuenca Mchique (2022) .....	204
Figura 134: Esquema hidráulico del escenario III de la cuenca Mchique (2050).....	205
Figura 135: Esquema hidráulico del escenario IV de la cuenca Mchique (2050).....	206
Figura 136: Balance hídrico del escenario I de la cuenca Mchique (2017) .....	207
Figura 137: Balance hídrico del escenario II de la cuenca Mchique (2022).....	207
Figura 138: Balance hídrico del escenario III de la cuenca Mchique (2050).....	208
Figura 139: Balance hídrico del escenario IV de la cuenca Mchique (2050).....	208
Figura 140: Comportamiento de la demanda hídrica de los escenarios futuros de la cuenca Anya.....	209
Figura 141: Comportamiento de la demanda hídrica de los escenarios futuros de la cuenca Mchique .....	210
Figura 142: Superficie total bajo riego (ha) en la cuenca Anya, para los escenarios I, II, III y IV .....	211
Figura 143: Superficie total bajo riego (ha) en la cuenca Mchique, para los escenarios I, II, III y IV .....	211
Figura 144: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 1.....	212
Figura 145: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 2.....	212
Figura 146: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 3.....	213
Figura 147: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 4.....	213
Figura 148: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 5.....	214
Figura 149: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 6.....	214
Figura 150: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 7.....	215
Figura 151: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 8.....	215
Figura 152: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 9.....	216
Figura 153: Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Anya - 1.....	216
Figura 154: Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Anya - 2.....	217
Figura 155: Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Anya - 3.....	217
Figura 156: Eje sobre la cultura del agua en la cuenca Anya - 1 .....	218
Figura 157: Eje sobre la cultura del agua en la cuenca Anya - 2 .....	218
Figura 158: Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Anya - 1 .....	219
Figura 159: Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Anya - 2 .....	219
Figura 160: Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Anya - 3 .....	220

Figura 161: Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Anya - 4 .....	220
Figura 162: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 1 .....	221
Figura 163: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 2 .....	221
Figura 164: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 3 .....	222
Figura 165: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 4 .....	222
Figura 166: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 5 .....	223
Figura 167: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 6 .....	223
Figura 168: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 7 .....	224
Figura 169: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 8 .....	224
Figura 170: Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 9 .....	225
Figura 171: Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Mchique - 1 .....	225
Figura 172: Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Mchique - 2 .....	226
Figura 173: Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Mchique - 3 .....	226
Figura 174: Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Mchique - 4 .....	227
Figura 175: Eje sobre la cultura del agua en la cuenca Mchique - 1 .....	227
Figura 176: Eje sobre la cultura del agua en la cuenca Mchique - 2 .....	228
Figura 177: Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Mchique - 1.....	228
Figura 178: Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Mchique - 2.....	229
Figura 179: Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Mchique - 3.....	229
Figura 180: Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Mchique - 4.....	230
Figura 181: Funcionabilidad y características de MODSIM (inglés).....	247

## ANEXOS

	<i>Pág.</i>
<b>Anexo 1: Del comportamiento de la precipitación total diaria y caudales medios diarios .....</b>	<b>148</b>
Anexo 1.1: Del análisis cartográfico y exploratorio de la información.....	148
Anexo 1.2: Hidrometeorología .....	169
<b>Anexo 2: De la determinación del balance hídrico .....</b>	<b>184</b>
Anexo 2. 1: Demanda hídrica de las cuencas Anya y Mchique .....	184
Anexo 2.2: Balance hídrico de las cuencas Anya y Mchique (diciembre 2011 – junio 2013) .....	191
<b>Anexo 3: De la simulación del comportamiento hidrológico de las cuencas .....</b>	<b>192</b>
Anexo 3.1: Del modelo hidrológico .....	192
Anexo 3.2: De los escenarios futuros .....	197
<b>Anexo 4: De la descripción de la percepción de la problemática de los recursos hídricos .....</b>	<b>212</b>
Anexo 4.1: Caso de la cuenca Anya .....	212
Anexo 4. 2: Caso de la cuenca Mchique .....	221
<b>Anexo 5: Panel fotográfico de actividades de campo .....</b>	<b>231</b>
<b>Anexo 6: Tablas en idioma original .....</b>	<b>247</b>
<b>Anexo 7: Formato de encuestas sobre los recursos hídricos .....</b>	<b>248</b>
<b>Anexo 8: Protocolo de uso de programas.....</b>	<b>252</b>
Anexo 8.1: Protocolo de uso de Hec-HMS 3.5.....	252
Anexo 8.2: Protocolo de uso de MODSIM 3.3.2.....	261



<b>Anexo 9: Mapas.....</b>	<b>272</b>
Mapa 1: Mapa de ubicación de las cuencas Anya y Mchique.....	272
Mapa 2: Mapa de cobertura y uso de suelo.....	273
Mapa 3: Mapa geológico.....	274
Mapa 4: Mapa de ubicación de estaciones hidrometeorológicas.....	275

## FOTOGRAFÍAS

	<i>Pág.</i>
Foto 1: Estaciones pluviométricas y meteorológicas instaladas por el Proyecto de Cooperación Belga VLIR/UOS-UNALM .....	233
Foto 2: Mecanismo Tipping bucket del pluviómetro RG3-M.....	234
Foto 3: Procedimiento de descarga de datos, estación pluviométrica Tambo .....	234
Foto 4: Procedimiento de descarga de datos, estación pluviométrica Colpar .....	235
Foto 5: Procedimiento de descarga de datos, estación pluviométrica Quero .....	235
Foto 6: Procedimiento de descarga de datos pluviométricos .....	236
Foto 7: Estación meteorológica Cruzpampa.....	236
Foto 8: Descarga y configuración de estaciones pluviométricas.....	237
Foto 9: Procedimiento de aforo del río Anya .....	237
Foto 10: Procedimiento de aforo del río Mchique.....	238
Foto 11: Estación hidrométrica Anya .....	238
Foto 12: Estación hidrométrica Mchique .....	239
Foto 13: Mantenimiento del equipo Diver del río Mchique.....	239
Foto 14: Procedimiento de descarga de datos del equipo Diver del río Anya.....	240
Foto 15: Vistas de la cuenca Anya en (a) época húmeda y (b) época seca .....	241
Foto 16: Vistas de la cuenca Mchique en (a) época húmeda y en (b) época seca .....	242
Foto 17: Vista panorámica del distrito de Quilcas .....	243
Foto 18: Vista panorámica del distrito de Sincos .....	243
Foto 19: (a) Siembra y (b) cosecha de papa en la cuenca Mchique .....	244
Foto 20: Cultivo de maíz en la cuenca Anya.....	244
Foto 21: Cultivo de papa y maíz en la cuenca Mchique.....	245
Foto 22: Estado de los canales de la cuenca Mchique.....	245
Foto 23: Toma rústica del canal de la cuenca Anya .....	246
Foto 24: Encuesta a la población de la cuenca Mchique, centro poblado de Aramachay. 246	
Foto 25: Encuesta de la población de la cuenca Anya, distrito de Quilcas .....	247

Foto 26: Problemas presentados en las labores de campo 1 .....	247
Foto 27: Problemas presentados en las labores de campo 2.....	248
Foto 28: Medición de la humedad del suelo con el equipo TDR .....	248

## I. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Mantaro es de gran importancia para el desarrollo de las actividades agropecuarias del centro país, especialmente de las actividades realizadas en el valle del Mantaro, siendo cultivadas entre 40 a 70 mil ha (Gobierno Regional de Junín, 2009). Asimismo, el valle del Mantaro alberga una población de 700,000 habitantes (MINAG, 2008), y constituye el espacio agrícola más amplio de la sierra del Perú, abarcando una dimensión de 53 km de largo (siendo la parte más angosta de 4 km y la parte más ancha de 21 km, aproximadamente). Por lo expuesto, la cuenca del río Mantaro y sus principales subcuencas (Chinchaycocha, Yanamarca, Yacus, Achamayo, Cunas, Shullcas, Chancas, Upamayu, Colcabamba, Churcampa, Vilca-Moya, Urubamba), han sido ampliamente estudiadas por diversas instituciones. Investigaciones como el estudio de “Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la Cuenca del Río Mantaro” realizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP, 2005), revelan escenarios climáticos futuros desalentadores en la cuenca del río Mantaro al año 2050. Entre sus resultados indican un incremento de 1°C y 1g/kg en la temperatura del aire y la humedad específica, respectivamente; así como, la disminución de la precipitación en la zona norte, central y sur de la cuenca en un 10, 19 y 14%, respectivamente. Por otro lado, son escasos los estudios realizados en las cuencas de los ríos Anya y Mchique (microcuencas del Mantaro), dado su bajo aporte hídrico en relación a las subcuencas antes mencionadas.

Por tales razones, es de suma importancia realizar el diagnóstico de los recursos hídricos de las cuencas Anya y Mchique, a fin de estudiar y entender el funcionamiento de los sistemas hidrológicos a través del modelamiento de las cuencas, estimar la oferta y demanda hídrica, y determinar el balance hídrico superficial.

Las cuencas Anya y Mchique, ubicadas en la margen izquierda y derecha del río Mantaro, respectivamente; dotan de volúmenes de agua indispensables para el desarrollo de las

actividades agropecuarias de los distritos de Quilcas, Saño y Sincos; ubicándose los dos primeros en la cuenca Anya, mientras que el distrito de Sincos se encuentra en la cuenca Mchique.

La presente investigación se elaboró en base a información primaria, *in situ*, obtenida directamente a partir de un intensivo plan de trabajo de campo realizado mensualmente en el departamento de Junín, distritos de Sincos, Quilcas y Saño; a través de la descarga de datos de 04 estaciones pluviométricas y 05 estaciones meteorológicas, instaladas previamente; la obtención de caudales medios diarios a partir del registro de los niveles de la superficie del agua, mediante la instalación de 02 reglas limnimétricas en los ríos Anya y Mchique; y actividades complementarias como: aforo de los ríos principales, inventario de recursos hídricos, encuestas a la población, recorrido e inspección de las cuencas en estudio, etc.

Se determinó el balance hídrico superficial en situación actual, para el periodo diciembre 2011 - junio 2013, mediante el contraste de la oferta y demanda hídrica de cada cuenca. La oferta hídrica se estimó a partir del aporte de los principales manantiales permanentes, y de los caudales medios de los ríos Anya y Mchique; estos últimos, obtenidos a partir de las lecturas de las respectivas reglas limnimétricas. Por otro lado, la demanda hídrica se estimó a través de la elaboración de la cédula de cultivo de ambas cuencas, a partir de la inspección de campo y el uso de la base de datos del IV CENAGRO (MINAGRI y INEI, 2013). Finalmente, el uso del modelo MODSIM, permitió elaborar el esquema hidráulico de las cuencas, asignar prioridades a cada demanda hídrica, y simular escenarios de balance hídrico a corto, mediano y largo plazo; para ello, la oferta hídrica futura fue obtenida a través del modelo determinístico Hec-HMS como modelo continuo, a través del módulo de pérdidas Soil Moisture Accounting.

Cabe mencionar que la presente tesis fue realizada en el marco del Proyecto de Cooperación Belga 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.

## **1.1. OBJETIVOS**

- a. Describir el comportamiento de la precipitación total diaria y caudales medios diarios producidos en las cuencas Anya y Mchique.
- b. Determinar el balance hídrico superficial de las cuencas Anya y Mchique.
- c. Simular el comportamiento hidrológico de las cuencas Anya y Mchique en situación actual, y determinados escenarios futuros de aprovechamiento hídrico y efectos del cambio climático.
- d. Describir la percepción de la población sobre la problemática de los recursos hídricos de ambas cuencas.

## **II. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

### **2.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS**

Surge de los trabajos realizados por Tukey (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.

Según la “Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe” (CAZALAC y PH-UNESCO, s.f.), el análisis exploratorio de datos consiste en el análisis de los datos empleando una variedad de técnicas (en su mayoría gráficas), para incrementar el entendimiento sobre ellos y visualizar las relaciones existentes entre las variables analizadas.

#### **2.1.1. Objetivos**

Entre los objetivos más relevantes del análisis exploratorio de datos están:

- Maximizar el entendimiento de los datos.
- Describir la estructura subyacente que poseen los datos (normalidad, multimodalidad, asimetría, curtosis, linealidad, homogeneidad entre grupos, homocedasticidad, etc.).
- Detectar las variables importantes.
- Detectar valores atípicos y anomalías.
- Comprobar los supuestos implícitos en los análisis.

- Determinar los ajustes óptimos de los factores.
- Proporcionar al analista, información relevante en cuanto al modelo que mejor ajusta los datos, una lista de valores atípicos, sentido de certeza en las conclusiones, estimaciones de los parámetros, grado de incertidumbre sobre las estimaciones, lista de las variables importantes, conclusiones sobre la significancia estadística de variables individuales.

### **2.1.2. Etapas**

Para realizar el análisis exploratorio de datos, Salvador Figueras y Gargallo (2003) recomiendan seguir las siguientes etapas:

- Preparar los datos para hacerlos accesibles a cualquier técnica estadística.
- Realizar un examen gráfico de la naturaleza de las variables individuales a analizar y un análisis descriptivo numérico que permita cuantificar algunos aspectos gráficos de los datos.
- Realizar un examen gráfico de las relaciones entre las variables analizadas y un análisis descriptivo numérico que cuantifique el grado de interrelación existente entre ellas.
- Evaluar, si fuera necesario, algunos supuestos básicos subyacentes a muchas técnicas estadísticas como, por ejemplo, la normalidad, linealidad y homocedasticidad.
- Identificar los posibles valores atípicos y evaluar el impacto potencial que puedan tener en los análisis estadísticos posteriores.
- Evaluar, si fuera necesario, el impacto potencial que pueden tener los datos faltantes sobre la representatividad de los datos analizados.

### **2.1.3. Preparación de datos**

El primer paso 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:



- *Cuantitativo o numérico*; 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.
- *Gráfico*; 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.

En la práctica, se utiliza una mezcla de ambos tipos de análisis, que depende de la escala de medida de la variable analizada tal como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1: Técnicas para el análisis exploratorio de datos**

Escala de medida	Representaciones gráficas	Medidas de tendencia central	Medidas de dispersión
Nominal	Diagrama de barras	Moda	-
	Diagrama de líneas		
	Diagrama de sectores		
Ordinal	Box plot	Mediana	Rango intercuartil
Intervalo	Histogramas	Media	Desviación típica
	Polígono de frecuencias		
Razón	-	Media geométrica	Coefficiente de variación

FUENTE: Salvador Figueras y Gargallo, 2003

## 2.2. PLUVIOMETRÍA

### 2.2.1. 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 2: Valores mínimos recomendados de densidad de estaciones (superficie, en km<sup>2</sup> 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 3, valores de superficies aceptables para una estación pluviométrica.

**Tabla 3: 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.

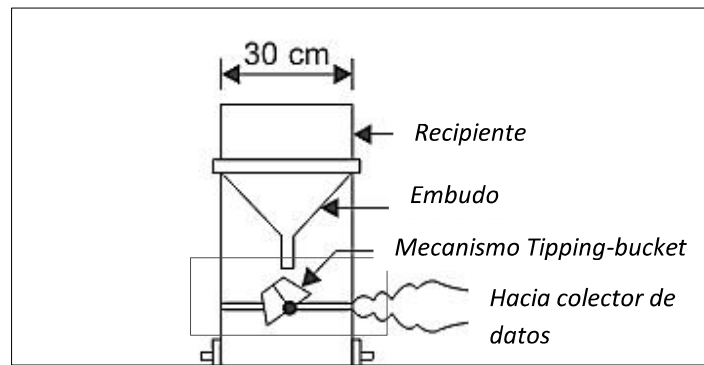
FUENTE: Raghunath, 2006

## 2.2.2. Pluviómetros de registro continuo

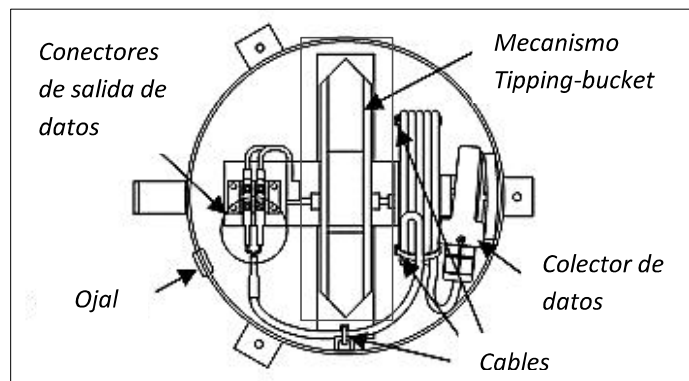
### a. Mecanismo *tipping-bucket*

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

### 2.2.3. Precipitación total diaria

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

Lafuente (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.

#### **2.2.4. Análisis de componentes principales**

Cortés (2010) sostiene que el análisis de componentes principales es un procedimiento estadístico de análisis multivariado, que transforma un conjunto de variables (correlacionadas) en un conjunto menor de variables ortogonales (no correlacionadas) llamadas componentes principales. Por lo tanto, el objetivo del análisis de componentes principales es reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos, con una pérdida mínima de información. Cabe mencionar que el concepto de mayor información está íntimamente relacionado con una mayor varianza o variabilidad de la data. Los componentes principales tienen como característica fundamental el no estar correlacionados, y que cada uno de ellos explica la mayor parte de la varianza contenida en los datos originales.

Morales (2013) sostiene que, para entender el objetivo de éste análisis multivariado, es necesario conocer lo siguiente:

- La data analizada está compuesta por individuos (por ejemplo: días del periodo de precipitación analizado) y características (por ejemplo: estaciones pluviométricas).
- La varianza muestra las diferencias entre cada uno de los valores de los individuos, para una misma característica. Si todos los individuos presentan el mismo valor, la varianza será cero; sin embargo, si la mitad presenta un valor “a” y la otra mitad un valor “b”, la varianza será la máxima.

- Cada individuo tiene una varianza; sin embargo, esta puede estar *compartida* con la varianza de otros individuos. Dicha relación viene expresada por el coeficiente de correlación  $r$  de Pearson; el cual, elevado al cuadrado ( $r^2$ ), expresa la proporción de varianza compartida. Si la correlación entre estos dos individuos fuera de 0.80, quiere decir que tienen un 64% de *varianza compartida*; siendo el resto *varianza no compartida*.
- La *varianza no compartida* puede ser descompuesta en otras dos fuentes: varianza específica de cada individuo y errores de medición.

De tal modo, el análisis factorial de componentes principales se centra en el análisis de la varianza compartida de cada una de las variables (estaciones pluviométricas), partiendo de una matriz de correlaciones.

#### ***a. Extracción de factores***

Es la primera fase a realizarse en un análisis de componentes principales, los cuales son extraídos de la matriz de correlaciones. A partir de lo anterior, se obtienen los valores propios y los vectores propios o pesos de cada variable, para cada componente o factor.

- ***Valores propios (Eigen values)***

Indican la cantidad total de varianza que es explicada por un factor o componente determinado, para las características consideradas como grupo.

- ***Vectores propios (Eigen vectors)***

Indican el grado de correlación o peso entre cada variable (estación pluviométrica) y un componente determinado. Los factores o componentes se consideran definidos por las características que tienen en él los mayores pesos. Para que una variable se considere que pertenece a un factor, debe tener en él una correlación razonablemente alta (por lo menos 0.30, o más) y no tenerlas mayores en otro factor. Un factor debe estar definido al menos por tres características para que merezca la pena tenerlo en cuenta.

### ***b. Rotación de factores***

Morales (2013) menciona que la rotación de los componentes principales busca obtener una estructura más simple e interpretable, puesto que la varianza encontrada en el análisis de componentes principales se redistribuye en todos los factores.

- ***Rotación varimax***

Es un tipo de rotación ortogonal que pretende simplificar la matriz de componentes para hacerla más fácilmente interpretable. Con la rotación varimax (varianza máxima) se intenta simplificar las columnas (los factores; se maximiza la varianza de las columnas).

## **2.3. 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.

### **2.3.1. 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.

### **2.3.2. 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 al menos a 2 lecturas de mira diarias y luego promediarlos.

### **2.3.3. 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.

#### **2.3.4. 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.

$$\bar{v}_i = v_{0.6h} \quad (1)$$

##### ***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.

$$\bar{v}_i = \frac{v_{0.2h} + v_{0.8h}}{2} \quad (2)$$

**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.

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

**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.

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

### **2.3.5. 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. El caudal se calcula utilizando el método de la sección media.

- **Método de la sección media**

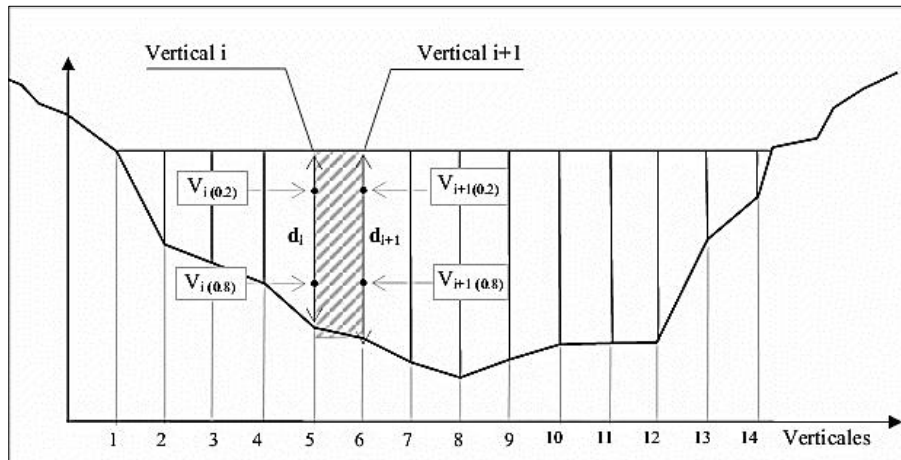
Se considera que la sección transversal está compuesta de un número de franjas, cada una de ellas limitada por dos verticales adyacentes. La ecuación 5 muestra el cálculo del caudal de la sección transversal.

$$q = \left( \frac{\bar{v}_i + \bar{v}_{i+1}}{2} \right) \cdot \left( \frac{d_i + d_{i+1}}{2} \right) \cdot b \quad (5)$$

Donde:

- $\bar{v}_i, \bar{v}_{i+1}$  : 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 los caudales parciales en 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 ( $m^3/s$ ).

### 2.3.6. Curva de duración de caudales

Davie (2008) sostiene que la culminación del análisis de frecuencia resulta en una curva de duración de caudales, esta se refiere a la cantidad de tiempo en el que se supera un cierto flujo. Los datos más comúnmente usados son los caudales medios diarios, los cuales representan el valor promedio para cada día (teniendo en cuenta que esto no es lo mismo que el caudal diario promedio, el cual es el promedio de una serie de caudales diarios).

La forma de una curva de caudales puede decir mucho sobre el régimen hidrológico de una cuenca. La Figura 4 muestra dos curvas de duración de caudales; la línea de puntos tiene una alta variabilidad en el flujo (similar a una pequeña cuenca con gran pendiente), en comparación con la línea continua (similar a una cuenca con caudal casi constante).



**Figura 4: Contraste entre dos curvas de duración de caudales**

FUENTE: Davie, 2008

## 2.4. ESTUDIO DE BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico es la comparación entre la oferta y demanda hídrica de una cuenca, cuyo resultado permite conocer el déficit y/o exceso del recurso hídrico. El punto de referencia

para desarrollar el balance hídrico de las subcuencas, es la “salida” de las mismas, a partir de ese punto se contabilizan la oferta y la demanda hídrica.

#### **2.4.1. Ecuación del balance hídrico de una cuenca**

Según el estudio hidrológico “Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Huancané y Suches” (ANA, 2010), el balance hídrico de una cuenca puede ser expresado mediante la ecuación 7.

$$\text{Balance hídrico} = Q - D \quad (7)$$

Donde:

$Q$  : Oferta hídrica (caudal) del río.

$D$  : Demanda hídrica.

El caudal medido o generado en un punto del río, viene a ser la oferta hídrica en situación natural; donde la evapotranspiración, infiltración, aguas subterráneas y entre otras variables, ya están descontadas; razón por la que las variables del ciclo hidrológico mencionados anteriormente, no se consideran en la ecuación del balance hídrico descrito en la ecuación 7.

##### ***a. Componentes del balance hídrico de la cuenca***

###### **• *Oferta hídrica (caudal)***

Es la disponibilidad hídrica de un río en estado natural, se puede obtener a partir del registro histórico o generación de las descargas medias utilizando un modelo de precipitación-escorrentía. Conocer la oferta hídrica de la cuenca permite optimizar y utilizar el recurso hídrico en forma racional y eficiente, en aprovechamiento de uso poblacional, agrícola, pecuario, poblacional, ecológico, entre otros usos.

###### **• *Demanda hídrica (usos de agua)***

Es el requerimiento de los usuarios para satisfacer una necesidad. En tal sentido el agua se caracteriza no sólo por la diversidad de usos, sino por la multiplicidad de usuarios. En demandas hídricas, debe obtenerse la información de usos actuales, proyectados y/o

futuros, para desarrollar el balance hídrico en situación actual y futura. Los usos de agua pueden ser, de agrícola, poblacional, industrial, minería, piscicultura y entre otros usos.

#### **2.4.2. Balance hídrico diario**

Los balances hídricos mensuales se justificaban en épocas pasadas por lo tedioso de los cálculos y por la carencia de equipos de computación. En la actualidad, con la existencia de computadores de gran capacidad y velocidad de cálculo, no se justifica continuar utilizando metodologías que se sabe no producen resultados muy precisos. Por las razones anteriores es necesario pensar en la conveniencia de utilizar los balances hídricos diarios para sustituir los métodos convencionales.

##### ***a. Ventajas***

- Proporcionan resultados más confiables.
- La mayoría de las variables climáticas se miden y publican como valores diarios.
- Utilización de metodologías que estiman mejor las relaciones agua-suelo-planta.
- Los resultados pueden ser utilizados en otras aplicaciones.

Los balances hídricos diarios representan una herramienta de gran utilidad en la planificación y manejo de cuencas. Pueden ser utilizados para: (a) el diseño de riego; (b) selección de cultivos; (c) determinación de épocas de siembra; (d) estimación de rendimiento de cultivos; (e) estimación de la erosión; (f) estimación de la escorrentía; g) drenaje y otros.

#### **2.4.3. Caudal ecológico**

Un caudal puede considerarse ecológico, siempre que sea capaz de mantener el funcionamiento, la composición y la estructura de un ecosistema fluvial, igual que en condiciones naturales (Martínez, 2002). Existen muchos caudales que pueden ser “ecológicos” para un cauce, pues éste de forma natural presenta fluctuaciones y extremos máximos y mínimos de caudal.

### ***a. Métodos de estimación del caudal ecológico***

Según González del Tanago y García de Jalón (1998), existen dos tipos de técnicas para conocer el límite máximo de aguas que se pueden extraer del río, sin afectar significativamente a sus comunidades naturales:

- Métodos que se basan en datos históricos sobre estiajes que de forma natural han ocurrido; y
- Métodos basados en las pautas de variación del hábitat de la fauna y flora acuática según el régimen de caudales.

El primer criterio estudia en especial los estiajes naturales de los ríos, bajo la hipótesis que sus comunidades de flora y fauna han evolucionado sometidas a fluctuaciones de caudal, y por tanto, sus ciclos biológicos y sus requerimientos ecológicos están adaptados a dichas fluctuaciones. Por lo mismo, las comunidades de flora y fauna están adaptadas a tolerar caudales mínimos durante un estiaje relativamente largo, e incluso, pueden tolerar caudales muy pequeños durante uno o varios días. El segundo criterio se basa en metodologías que relacionan los requerimientos de hábitat de las comunidades de flora y fauna de un río, con las variaciones de éste según el régimen de caudales. La base de esta metodología es conocer los requerimientos de caudal de algunas especies o comunidades acuáticas y su distribución en el tiempo.

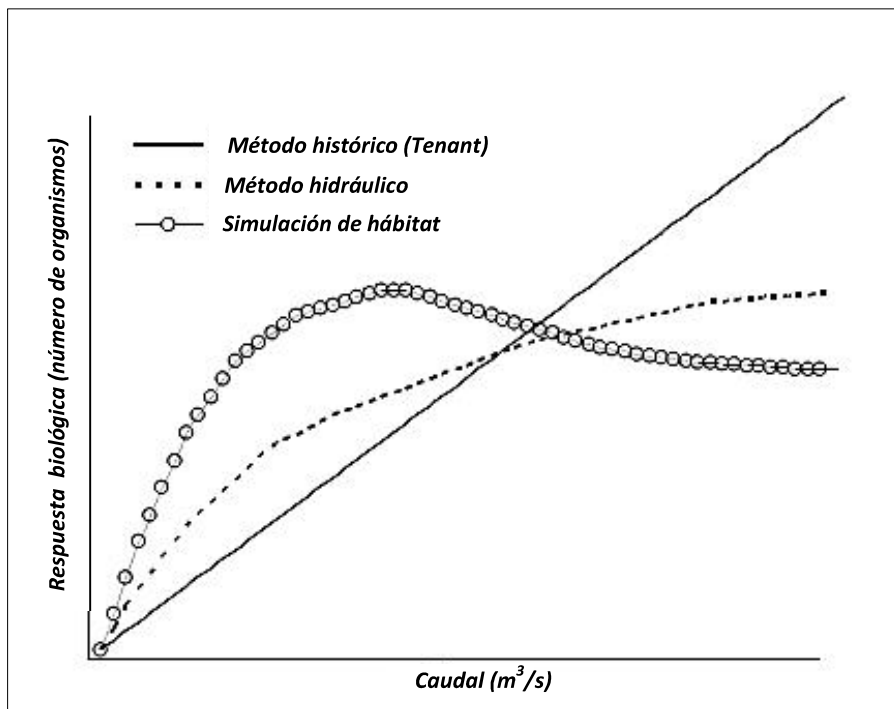
En ambas metodologías el criterio para determinar un caudal ecológico reside en calcular la respuesta de las comunidades del ecosistema a la disminución de caudal. Si la disminución de caudal cae por debajo de un determinado umbral, la respuesta de la comunidad biológica dejará de ser elástica para convertirse en plástica. Es decir, los cambios en ella dejan de ser reversibles y la comunidad no se recupera de las perturbaciones ocasionadas por la falta de agua. Por lo tanto, el cálculo de caudales ecológicos, busca determinar valores de caudal por encima de estos umbrales.

La Tabla 4 muestra las ventajas y desventajas de los diferentes métodos existentes para la estimación del caudal ecológico.

**Tabla 4: Métodos para la estimación del caudal ecológico**

Método	Sub categoría	Tiempo requerido	Ventajas	Desventajas
Índice hidrológico	Tenant (1970)	Dos semanas	Bajo costo. Uso rápido	No es específico para el espacio geográfico. Requiere una revisión exhaustiva. Se asume que existe el link ecológico.
Hidráulico	Perímetro mojado	2 - 4 meses	Bajo costo. Sitio específico. Recolección de data nueva limitada.	Se asume que existe una relación con el medio ambiente.
Simulación de hábitad	IFIM (Instream Flow Incremental Methodology)	6 - 36 meses	Link hidrológico aceptable. Replicable. Predecible.	Caro y extenso el proceso de recolectar data hidráulica y ambiental.
Holístico		12 - 36 meses	Cubre casi todo los aspectos. Robusto. Considera el ecosistema completo.	Caro. Grupo de panel de expertos. Consenso a veces puede no ser alcanzado.

FUENTE: Tharme, 2003



**Figura 5: Relación hipotética entre el incremento de caudales y la respuesta biológica**

FUENTE: Davie, 2008



La forma en que estos métodos tratan la relación entre el aumento del caudal y la respuesta biológica se muestra en la Figura 5. Según Davie (2008), el método de Tenant (método histórico) supone una relación lineal, de modo que a más caudal, mayor será la respuesta biológica. El método hidráulico reconoce que los lechos de los arroyos no son lineales en su forma y por lo tanto, un pequeño cambio en el flujo puede dar lugar a gran aumentos en la productividad biológica pero que esta disminuye a medida que aumenta el flujo. Finalmente, el método de simulación de hábitat reconoce que hay un máximo en la productividad biológica y altos caudales, los cuales pueden dar lugar a la disminución de la respuesta biológica.

#### ***b. Normatividad peruana***

##### **Reglamento de la ley de Recursos Hídricos N° 29338**

##### ***Artículo 154°.- Características del caudal ecológico***

“Los caudales ecológicos pueden presentar variaciones a lo largo del año, en cuanto a su cantidad, para reproducir las condiciones naturales necesarias para el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos y conservación de los cauces de los ríos”.

##### ***Artículo 155°.- Metodología para determinar el caudal ecológico***

“Las metodologías para la determinación del caudal ecológico, serán establecidas por la Autoridad Nacional del Agua, en coordinación con el Ministerio del Ambiente, con la participación de las autoridades sectoriales competentes, en función a las particularidades de cada curso o cuerpo de agua y los objetivos específicos a ser alcanzados”.

#### **2.4.4. Modelos de gestión**

Las crecientes presiones antrópicas sobre los recursos hídricos, de naturaleza variable, han condicionado la necesidad de establecer complejas infraestructuras hidráulicas para garantizar las demandas consuntivas y ambientales; ello ha motivado el desarrollo de herramientas matemáticas que faciliten el análisis de su comportamiento y su gestión integral. Según el estudio “Análisis de las condiciones de aprovechamiento de los recursos hídricos en la cuenca de los ríos Saja-Besaya” (2012), los modelos de gestión utilizados

actualmente se clasifican en los basados en reglas y los de optimización.

- *Modelos basados en reglas*; caracterizan porque el funcionamiento del sistema hidráulico se define y limita con base en reglas de gestión que se establecen a priori. Son más sencillos desde el punto de vista conceptual, pero presentan el inconveniente de no asegurar que el sistema alcance condiciones de funcionamiento óptimo (ejemplo: HecResSim).
- *Modelos de optimización*; son capaces de definir las reglas de funcionamiento óptimo del sistema, a partir del establecimiento de unos objetivos a alcanzar para una serie de variables (hidráulicas, de consumo energético, de calidad del recurso, etc.). Su dificultad puede resultar en el planteamiento de condiciones de funcionamiento no aplicables en la práctica; por ello, es habitual que muchos de estos modelos sean híbridos de los anteriores, pudiendo incorporar reglas de funcionamiento concretas (ejemplo: MODSIM, Aquatools, RiverWare).

#### **a. Modelo MODSIM**

MODSIM-DSS (*Decision Support System*) es un modelo genérico de simulación de operaciones de un sistema hidráulico, desarrollado como soporte de decisiones y utilizado para la simulación hidrológica de sistemas de redes de cauces de una cuenca. El modelo tiene la capacidad de incorporar simultáneamente la complejidad física, hidrológica y los aspectos institucionales y administrativos del manejo de una cuenca, incluyendo los derechos de agua. Fue inicialmente desarrollado por el Dr. John Labadie de la Universidad de Colorado State (CSU) en la mitad de los años 70's y ha sido utilizado en diversas partes del mundo.

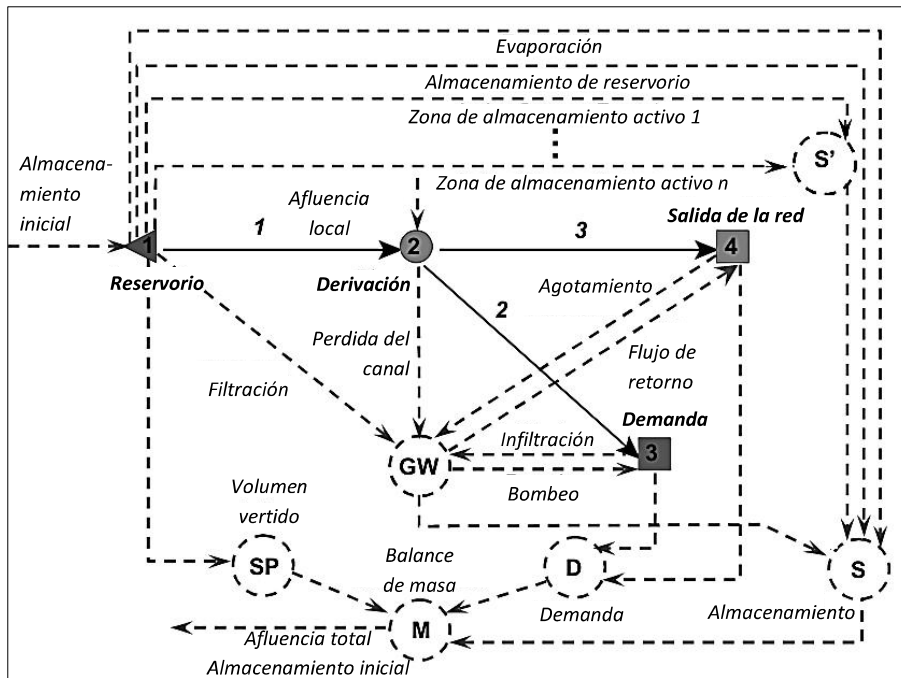
El sistema hidráulico a analizar se define en MODSIM mediante cuatro tipos de elementos: nodos sin almacenamiento (puntos de cálculo del sistema), nodos de demanda (tomas de abastecimiento), embalses y las conexiones (conductos y canales naturales) entre los anteriores. A través de estos nodos, y de la variación de sus características, pueden modelarse sistemas complejos, obteniéndose resultados a nivel diario, semanal y mensual. Según Labadie (2010), aunque MODSIM es ante todo un modelo de simulación, la optimización del flujo de red proporciona un medio eficaz de asegurar la asignación de

flujos en una cuenca hidrográfica, de conformidad con los derechos de agua especificados y otras clasificaciones de prioridades. Asimismo, MODSIM asume:

- Todos los nodos de almacenamiento y los vínculos están delimitados superior e inferiormente (es decir, el almacenamiento mínimo y máximo, así como los flujos, se dan con éste último permitido a variar con el tiempo).
- Cada vinculación entre nodos debe ser unidireccional con respecto al flujo positivo; reversiones de flujo pueden ser modelados mediante la asignación de un enlace de dirección inversa adicional entre dos nodos.
- Todos los flujos de entrada, las demandas, las ganancias y las pérdidas del sistema deben acumularse en los nodos; el aumento de la densidad de nodos en la red aumenta la precisión de la simulación, pero también aumenta el tiempo de procesamiento y las necesidades de datos.

- ***Optimización de la red de flujo***

Labadie (2010) señala que los enlaces y nodos en MODSIM no se limitan a la representación física e hidrológica de las características del sistema cuenca hidrográfica, también se utilizan para simbolizar, artificialmente y conceptualmente, elementos de los mecanismos administrativos y legales que rigen el modelado de la asignación de agua; además de los enlaces y nodos definidos por los usuarios, varios nodos artificiales y enlaces son creados automáticamente por MODSIM. Estos nodos y enlaces artificiales son esenciales para asegurar el cumplimiento del balance de masa en toda la red. La Figura 6 muestra una red de 04 nodos creados por el usuario de MODSIM (1, reservorio; 2, derivación; 3, demanda; 4, salida del sistema); sin embargo, el modelo MODSIM considera la creación de nodos artificiales a fin de realizar un balance de masa (M) que considere: el volumen vertido por el reservorio (SP) definido por la descarga del reservorio; la demanda (D), definido por las demandas propiamente dichas y el volumen en la salida de la red; y almacenamiento final del reservorio (S), definido por las filtraciones del reservorio, pérdidas de canal, agotamiento de cauces, flujos de retorno, infiltración, bombeo, la evaporación del reservorio, el almacenamiento del reservorio y las zonas de almacenamiento activo del reservorio. Cabe señalar que los usuarios MODSIM sólo son responsables de la definición de la red de flujo física. Todos los nodos artificiales y enlaces son añadidas automáticamente por el modelo.



**Figura 6: Estructura de la red MODSIM con nodos artificiales**  
 FUENTE: Labadie, 2010

MODSIM simula los mecanismos de asignación de recursos hídricos en una cuenca hidrográfica, a través de la solución secuencial de un problema de optimización del flujo de red para cada periodo de tiempo  $t = 1, \dots, T$ :

- Minimiza:

$$\sum_k^A c_k q_k \quad (8)$$

- Para todos los nodos  $i \in N$ :

$$\sum_k^{O_i} q_k - \sum_j^{I_i} q_j = b_{it}(q) \quad (9)$$











- Para todos los enlaces  $k \in A$ :

$$l_{kt}(q) \leq q_k \leq u_{kt}(q) \quad (10)$$

Donde  $A$  representa el conjunto de todos los enlaces en la red;  $N$  es el conjunto de todos los nodos de la red;  $O_i$  es el conjunto de todos los enlaces que se originan en el nodo  $i$  (es decir, enlaces de flujo de salida);  $I_i$  es el conjunto de todos los enlaces que terminan en el nodo  $i$  (es decir, enlaces de flujo de entrada);  $b_{it}$  es la ganancia o (negativo) pérdida

(positivo) del nodo  $i$  en el momento  $t$ ;  $q_k$  es el caudal en el enlace  $k$ ;  $c_k$  son los costos, factores de ponderación o prioridades en el enlace  $k$ ;  $l_{kt}$  y  $u_{kt}$  se especifican como límites inferior y superior respectivamente, sobre el enlace  $k$ , en el tiempo  $t$ . Los parámetros  $b_{its}$ ,  $l_{kt}$ ,  $u_{kt}$  se definen como el vector de funciones de flujo  $q$  en la red.

La Figura 7 resume los requisitos de funcionalidad y los datos de cada objeto MODSIM. La configuración de los componentes del modelo dependerá de cuán complejo sea el sistema hidráulico a estudiar; permitiendo simular alternativas para el mejor y óptimo aprovechamiento hídrico.

Icono	Funcionalidad	Requerimiento de datos
 <i>Embalse (operación)</i>	Operación de embalses Control de excedentes y almacenamiento muerto de embalses Zonas de equilibrio para el almacenamiento en sistemas de múltiples embalses	Tablas de elevación-área-capacidad Almacenamiento inicial, mínimo y máximo Tablas de balance del embalse Tablas de la capacidad hidráulica de salida Pérdidas por evaporación
 <i>Embalse (hidroeléctrico)</i>	Energía hidroeléctrica Almacenamiento bombeado	Capacidad de energía de la planta
 <i>Derechos de almacenamiento de embalses</i>	Propiedad y mantenimiento del embalse	Derecho de usuarios Grupo de propietarios
 <i>Nodo</i>	Escurrimiento de la cuenca Flujos tributarios Confluencia y desviación del flujo Flujos de retorno de agua subterránea Agotamiento de corrientes	Serie de tiempo del flujo
 <i>Demanda</i>	Demanda consuntiva Bombeo de agua subterránea	Series de tiempo de las demandas Prioridad de las demandas Eficiencia de uso Parámetros del acuífero
 <i>Demanda ecológica</i>	Requerimientos ecológicos o de navegación Demanda no consuntiva Estación de aforo para calibración de modelos	Serie de tiempo de los requerimientos hídricos Prioridad de las demandas Flujo observado, para la calibración
 <i>Salida</i>	Salida de la cuenca	
 <i>Link</i>	Pérdidas del canal Flujo máximo y mínimo	Serie de tiempo de las capacidades máximas Link costo - beneficio
 <i>Multi link</i>	Representa las pérdidas del canal mediante una función no lineal Función no lineal de costo-descarga	Serie de tiempo de las capacidades máximas Link costo-beneficio
 <i>Link</i>	Caudal y enrutamiento de canales	Coefficientes del método Muskingum Coefficiente de retardo

**Figura 7: Funcionalidad y características de MODSIM**

FUENTE: Labadie, 2010

## 2.5. MODELO HIDROLÓGICO

El uso de modelos hidrológicos tiene por finalidad simular los fenómenos que ocurren en la realidad; sin embargo, a pesar de los recientes avances en ciencia y tecnología, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferentes orígenes. Estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración.

### 2.5.1. Modelamiento determinístico

Según Salgado y Güitrón de los Reyes (2012), la modelación hidrológica se clasifica en estocástica y determinística. Un modelo es estocástico cuando al menos una variable del mismo es tomada como un dato al azar y las relaciones entre variables se toman 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 tienen tres tipos de modelos: empíricos (también llamados de caja negra), 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 implicados.
- Los modelos hidrológicos *agregados* son modelos conceptuales que tratan de reproducir los procesos hidrológicos implicados en la transformación lluvia-escorrentía, 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.

### **2.5.2. Calibración del modelo**

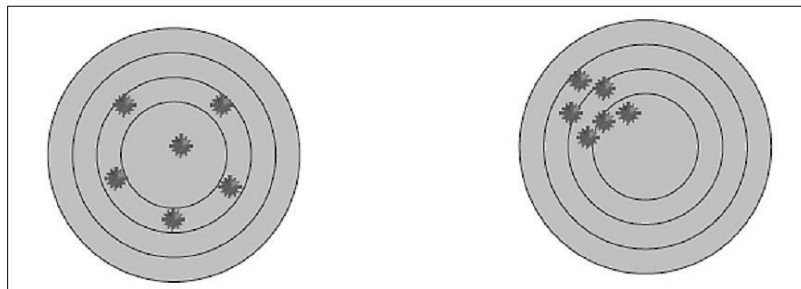
El proceso de calibración se centra en minimizar las diferencias entre los datos observados y los datos simulados. Cabrera (s.f.) sostiene que el “criterio de exactitud” se basa en el ajuste de parámetros como medio de calibración, y que el uso de modelos determinísticos requiere el manejo de términos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

- *Variables de ingreso*; son series de datos a la cuales se les aplicaran ecuaciones para intentar representar otra variable. Se asume que estas variables de ingreso son independientes, es decir, no dependen de ninguna otra (ejemplo: precipitación, temperatura).
- *Parámetros*; son valores 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 éstos 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 a la medida observada. La Figura 8 ilustra estos conceptos.



**Figura 8: 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, el dato simulado se encontrará alrededor del dato observado, 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 todos los datos simulados se encuentren “desviadas” en un mismo valor de los datos



observados (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 las cuales son:

- *Errores (sistemáticos y aleatorios) en los datos de ingreso;* son errores propios de los datos de ingreso, los cuales no necesariamente son datos de campo. Por ejemplo, si se ingresa la precipitación media de una cuenca y esta serie se obtiene utilizando polígonos de Thiessen, la aplicación de este método produce ciertos errores en relación a otro método como el método de Isoyetas.
- *Errores (sistemáticos y 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 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.

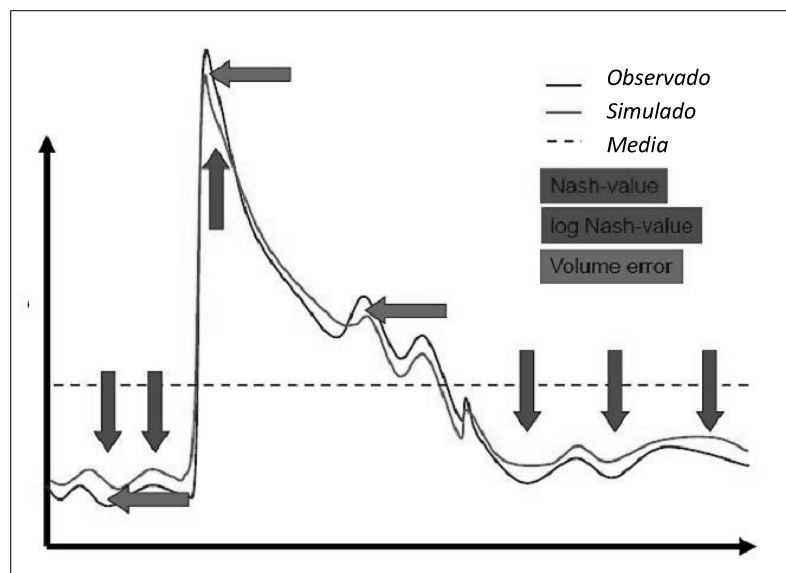
El proceso de calibración puede minimizar las tres primeras; sin embargo, no altera la cuarta, por este motivo es importante discriminar los efectos de cada fuente de error. Asimismo, la calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulados 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: *hill-climbing techniques, simulated annealing, etc.*

### c. Función objetivo

Para iniciar el proceso de calibración es necesario definir previamente la “función objetivo”, la cual permitirá estimar la incertidumbre de las series de caudales simulados respecto a los observados. La función objetivo es usualmente una medida de bondad de ajuste (error de balance de masas, coeficiente de correlación, eficiencia de Nash-Sutcliffe, etc). La Figura 9 ilustra los conceptos de las medidas de bondad de ajuste más usadas en hidrología. 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.



**Figura 9: Efectos de las medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo**

FUENTE: Finger, 2011

### 2.5.3. Validación del modelo

Refsgaard y Knudsen (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 futuras 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*

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.

#### **2.5.4. Modelo hidrológico Hec-HMS**

Dentro de los modelos de simulación hidrológica usados a nivel mundial, se encuentra el Hec-HMS, el cual fue diseñado para simular la respuesta hidrológica de una cuenca a la precipitación, mediante un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos, cada uno 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 (interceptación 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 (Deficit 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).

Conceptualmente, el submodelo de pérdidas *Soil Moisture Accounting* está basado en la ecuación de balance hídrico expresada en la ecuación 11 (US Army Corps of Engineers, 2010).

$$\text{Escorrentía} = \text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración} - \text{Humedad del suelo (continua)} \quad (11)$$

## **2.6. RESUMEN DE ESTUDIOS REALIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO**

En el valle del Mantaro existen varios estudios realizados por diversas instituciones tanto públicas como privadas, en tal sentido, es necesario realizar un resumen de la información existente de la zona en estudio, con la finalidad de evitar la duplicidad de la investigación o en su defecto tomar como experiencia los resultados obtenidos en dichos estudios.

### **2.6.1. 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 litoestratigráficas 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, depósitos fluvioglaciares del cuaternario, la serie basal de 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 en el párrafo anterior, es mostrada en el Mapa 2 del Anexo 9.

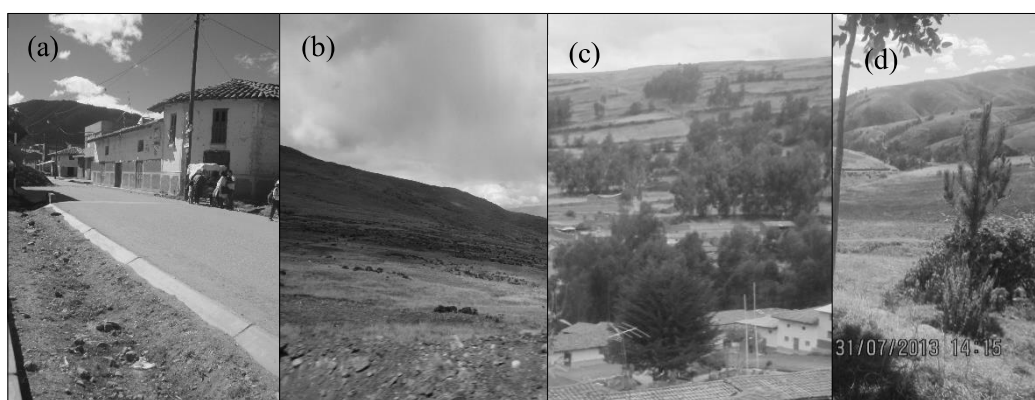
#### ***b. Suelos***

Según la información recopilada por el estudio “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 arcillas; variando espacialmente su clasificación textural de franco-arenosa a franco-arcillo-arenosa. Asimismo, 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 los 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-arcillo-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%.

### 2.6.2. Cobertura y uso de suelo

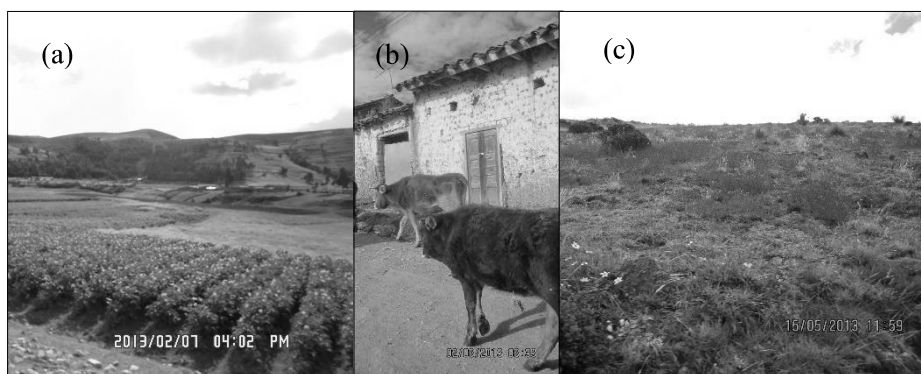
Grados (2012) señala que las coberturas y usos de suelo predominantes en la cuenca Anya están clasificadas como césped de puna (pajonal) y áreas agrícolas, las cuales representan aproximadamente el 42.71 y 42.03% del total de la cuenca. Asimismo, el área ocupada por bosques ocupa un 9.88%, mientras que el área urbana sólo un 5.38% del total. La Figura 10 muestra cada una de las coberturas y usos de suelo de la cuenca Anya.



**Figura 10: Cobertura y uso de suelo de la cuenca del Anya: (a) Población, (b) Pajonal, (c) Bosques y (d) Agrícola**

FUENTE: Elaboración propia

Por otro lado, las coberturas y usos de suelo predominantes en la cuenca Mchique están 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 11 muestra cada una de las coberturas y usos de suelo de la cuenca Mchique.



**Figura 11: Cobertura y uso de suelo de la cuenca del Mchique: (a) Agrícola, (b) Poblacional y (c) Pajonal**

FUENTE: Elaboración propia

Asimismo, el Mapa 3 presentado en el Anexo 9, muestra a detalle la distribución espacial de las coberturas y usos de suelo para cada una de las cuencas en estudio.

### **2.6.3. Clima**

El clima del valle del Mantaro se caracteriza tener dos estaciones bien marcadas según su régimen de humedad tal como se aprecia en las Fotos 15 y 16 del Anexo 5, la estación seca (mayo-agosto) y la estación húmeda (setiembre-abril). Asimismo, las cuencas Anya y Mchique están sujetas a temperaturas diarias que, en promedio, fluctúan entre 0.3 y 20 °C. Dichas condiciones térmicas ocasionan frecuentes enfriamientos que alcanzan temperaturas bajo cero, exponiendo a los cultivos a graves riesgos de heladas y pérdidas que afectan a la economía nacional, regional y local.

### **2.6.4. Ecología**

#### ***a. Fauna***

La fauna de las cuencas Anya y Mchique, se caracteriza por la abundancia de aves silvestres como la paloma, zorzales, gorriones, cernícalos, chihuaco, yanawicos, chorlitos, jilgueros, halcones, etc. Mamíferos en las zonas altas, como el zorro colorado, añas o zorrillo, bizcachas, venados, tarukas, vicuñas, gato montés, zarigüeyas, alpacas, guanacos, etc.; así como, ganado vacuno, ovino y equino (DIRCETUR JUNIN, 2009).

#### ***b. Flora***

La flora de las cuencas Anya y Mchique se caracteriza por la abundancia de arbustos como la chilca, cantuta, maguey, retama, tanquish, anís, tumbo, tacma; además, por la presencia

de árboles como eucalipto, molle, ciprés, pino y álamo; hierbas medicinales como chinche, hierba buena, llantén, yuyo, ortiga, atajo, ulmish, muña, paico, berros y verbena. (DIRCETUR JUNIN, 2009).

### 2.6.5. Máximas avenidas de los ríos Anya y Mchique

Según el estudio de máximas avenidas realizado por Grados (2012), los caudales máximos ocurridos en ríos Anya y Mchique llegan a valores de 3.57 y 1.94 m<sup>3</sup>/s, respectivamente; representando un potencial peligro para la población de las cuencas, debido a desbordes, daños a la propiedad privada y a la integridad física de la población aledaña a la margen de ambos ríos. La Figura 12 muestra la clara diferencia de la morfología de los ríos Mchique (izquierda) y Anya (derecha).



Figura 12: Ríos principales de las cuencas en estudio: (a) Río Mchique y (b) Río Anya  
FUENTE: Elaboración propia

### 2.6.6. Aspecto socio-económico

#### a. Niveles de pobreza

Según el “Mapa de pobreza de distrital y provincial” (INEI y UNFPA, 2010), la provincia de Huancayo muestra un porcentaje de pobreza extrema del 6.4%; dentro del cual, de un total de 36 distritos, los distritos de Saño y Quilcas ocupan un 12.9 y 19.3%, respectivamente. Por otro lado, la provincia de Jauja presenta un porcentaje de pobreza extrema del 10%, dentro del cual, de un total de 34 distrito, el distrito de Sincos ocupa el 6.4%.



### 2.6.7. Escenarios climáticos futuros en la cuenca del Mantaro

El estudio de “Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la cuenca del río Mantaro” (IGP, 2005), elaboró escenarios climáticos futuros para la cuenca del Mantaro a través de un *dowscaling* estadístico. Dicho método consiste en buscar relaciones estadísticas entre las variables climáticas en la región de interés y ciertos parámetros; representando las condiciones climáticas de gran escala, las cuales pueden ser adecuadamente representadas por los modelos climáticos globales. Posteriormente, se pueden aplicar las relaciones halladas a los datos de los escenarios climáticos globales para determinar los escenarios regionales.

Dicha investigación estimó una disminución en la precipitación promedio de 19% en la Región Central, de 14% en la Región Sur y de 10% en la subcuenca de Chinchaycocha, para el 2050. La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos por los diferentes modelos de circulación global (GCM, por sus siglas en inglés). Por otro lado, las estimaciones del cambio en temperatura y humedad específica para la cuenca del Mantaro mostraron que los cambios estimados promediados sobre todos los modelos y escenarios en la temperatura y humedad específica son de +1,3°C y +1 g/kg, respectivamente, mientras que el de humedad relativa es de -6 %.

**Tabla 5: Cambios porcentuales en precipitación al 2050, estimados para diferentes regiones de la cuenca Mantaro**

Centro	Escen.	Subcuenca de Chinchaycocha	Cuenca media	Cuenca Baja
MPIfM	A2	-12,1%	-22%	-15,8%
	B2	-7,7%	-14%	-10,1%
CCCma	A2	-8,4%	-15,4%	-11,1%
	B2	-8,1%	-14,9%	-10,7%
CCSR/NIES	A1	-14,4%	-26,3%	-18,8%
	A2	-11,4%	-20,8%	-14,9%
	B2	-9,2%	-16,8%	-12,0%
NCAR	A1	-10,5%	-19,2%	-13,8%
CSIRO	A1	-12,8%	-23,4%	-16,8%
	A2	-11,3%	-20,6%	-14,8%
	B2	-11,5%	-21,0%	-15,1%
<b>Promedio</b>		-10,4%	-19,1%	-13,7%
<b>Desviación estándar</b>		1,5%	2,7%	1,9%

Fuente: IGP, 2005

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. MATERIALES

##### 3.1.1. 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. El Cuadro 1 muestra a detalle la localización política de las cuencas en estudio. La ubicación de las cuencas en estudio puede ser apreciada en el Mapa 1, presentado en el Anexo 9.

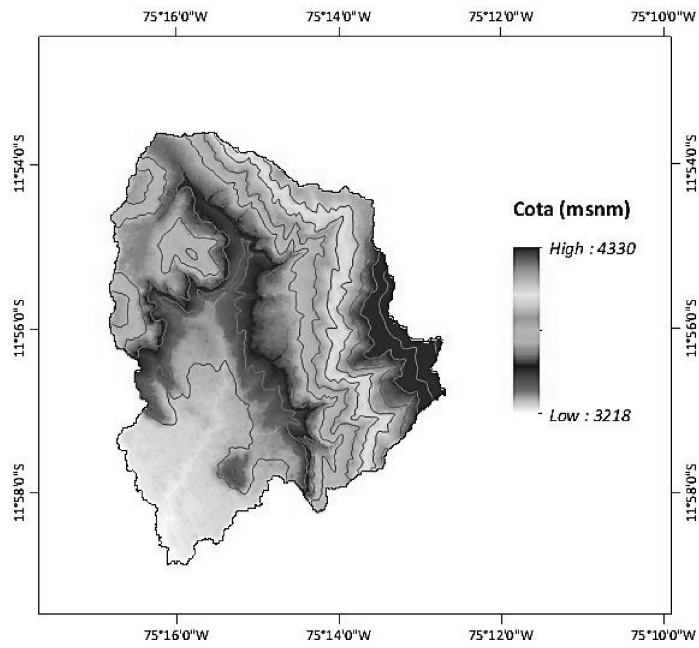
**Cuadro 1: Ubicación política de las cuencas Anya y Mchique**

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

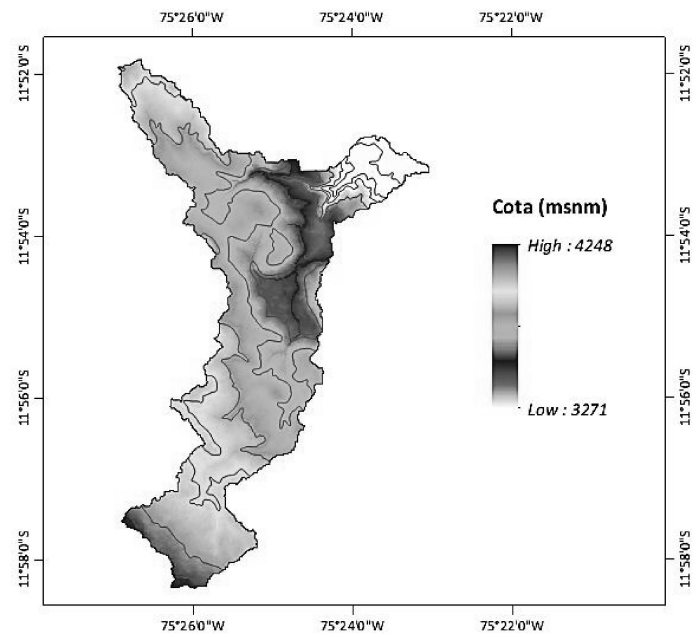
FUENTE: Elaboración propia

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.

Las características topográficas y altimétricas de las cuencas Anya y Mchique, pueden ser apreciadas en la Figura 13 y la Figura 14; estas cuencas presentan tres tipos de relieves: plano o llanura en la parte baja de la cuenca donde está asentada la población urbana, colinas en donde se siembra la papa nativa y finalmente un relieve montañoso.



**Figura 13: Altimetría de la cuenca del río Anya**  
 FUENTE: Elaboración propia



**Figura 14: Altimetría de la cuenca del río Mchique**  
 FUENTE: Elaboración propia

Por otro lado, ambas cuencas desarrollan una agricultura predominantemente extensiva, destinando la mayor parte de su producción al autoconsumo debido a la poca

infraestructura hidráulica existente y a la práctica de la agricultura de secano. Asimismo, existen pocas áreas bajo riego por gravedad, siendo los cultivos predominantes: papa, alfalfa y maíz. Finalmente, la ausencia de una estructura clara que propicie la organización del riego en las cuencas, así como la ausencia de comités de riego debidamente conformados y capacitados, dificulta la gestión de los recursos hídricos y el mejoramiento del riego en las cuencas Anya y Mchique. Por ejemplo, el comité de riego de Saño (cuenca Anya) y los comités de Aramachay y Chacrampa (cuenca Mchique), no cuentan con información técnica relacionada a cédula de cultivos, volúmenes de captación, dotaciones de agua, etc.

### **3.1.2. Información cartográfica**

Como fuente cartográfica se utilizó la carta nacional 24-m (Jauja) desarrollado por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) a 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 presente en el Anexo 9; en donde se detallan las diferentes coberturas y uso de suelo, así como su distribución en las cuencas de estudio.

### **3.1.3. 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, 1994) a 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 presente en el Anexo 9; en donde se detallan las diferentes unidades litoestratigráficas y su respectiva distribución en las cuencas de estudio.

### 3.1.4. Información meteorológica

Se obtuvo de manera directa (*in situ*) a partir de las estaciones meteorológicas automáticas, instaladas en las cuencas en estudio; considerando las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011). Dichas estaciones se muestran en la Foto 1 del panel fotográfico (Anexo 5). La información fue recolectada mensualmente, para el período de estudio diciembre 2011 – junio 2013. El Mapa 4 presentado en el Anexo 9, muestra en forma detalla la ubicación de cada una de las estaciones meteorológicas.

El Cuadro 2 detalla la ubicación de las estaciones situadas en la cuenca del río Anya.

**Cuadro 2: Ubicación de estaciones meteorológicas en la cuenca Anya**

Estación	Longitud	Latitud	Altura (msnm)	Tipo de estación
Tambo	75.23°O	11.92°S	4097	Pluviométrica
Colpar	75.25°O	11.92°S	3509	Pluviométrica
Quilcas	75.26°O	11.93°S	3355	Meteorológica

FUENTE: Elaboración propia

El Cuadro 3 detalla la ubicación de las estaciones situadas en la cuenca del río Mchique.

**Cuadro 3: Ubicación de estaciones meteorológicas en la cuenca Mchique**

Estación	Longitud	Latitud	Altura (msnm)	Tipo de estación
Cruzpampa	75.43°O	11.92°S	3894	Meteorológica
Chacrampa	75.40°O	11.90°S	3619	Meteorológica
Sincos	75.38°O	11.89°S	3328	Pluviométrica

FUENTE: Elaboración propia

Asimismo, se instalaron estaciones complementarias a fin de obtener una mejor distribución de la data pluviométrica. El Cuadro 4 detalla la ubicación de las estaciones complementarias.

**Cuadro 4: Ubicación de estaciones meteorológicas complementarias**

<b>Estación</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Altura (msnm)</b>	<b>Tipo de estación</b>
Quero	75.38°O	11.71°S	3882	Pluviométrica
Molinos	75.45°O	11.74°S	3427	Meteorológica
Yanamuelo	75.40°O	11.86°S	3330	Meteorológica

FUENTE: Elaboración propia

Cabe mencionar que el registro de las estaciones complementarias usado para la presente investigación corresponde sólo al 2012; cuya data se utilizó para el análisis de la variabilidad de la precipitación total diaria.

### **3.1.5. Información hidrométrica**

Se obtuvo a través del registro de los niveles de la superficie del agua de los ríos Anya y Mchique, a partir de la instalación previa de reglas limnimétricas, las cuales se muestran en la Foto 11 y 12 del Anexo 5. Posteriormente, se instalaron dos registradores automáticos (*dataloggers – diver*) que permitieron el registro de los niveles de los ríos principales Anya y Mchique, para un intervalo de registro de cinco minutos.

El Cuadro 5 presenta la ubicación detallada de las estaciones hidrométricas en las cuencas en estudio.

**Cuadro 5: Ubicación de estaciones hidrométricas en las cuencas en estudio**

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

FUENTE: Elaboración propia

El Cuadro 6 detalla la ubicación de los equipos *divers*, instalados en los ríos principales de las cuencas Anya y Mchique.

**Cuadro 6: Ubicación de equipos diver en las cuencas en estudio**

<b>Diver</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Altura (msnm)</b>	<b>Tipo</b>
Diver Anya	75.26°O	11.95°S	3279	Datalogger
Diver Mchique	75.40°O	11.89°S	3350	Datalogger

FUENTE: Elaboración propia

Asimismo, se elaboraron las respectivas curvas de calibración altura-caudal, para cada una de las estaciones hidrométricas, a partir de la realización de aforos periódicos en épocas de estiaje y crecidas en los ríos Anya y Mchique.

### **3.1.6. Materiales, equipos y programas de cómputo**

#### ***a. Equipos***

##### ***Equipos de campo***

##### **- Global Water Flow Probe FP111 (1 unid.)**

Instrumento para la medición de la velocidad de flujo (correntómetro) con capacidad para la obtención instantánea máxima, mínima y promedio de la celeridad. 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 m/s en la pantalla LCD del equipo. El rango de medición es de 0.1 - 6.1 m/s y cuenta con una precisión de 0.1 m/s. Posee un registrador de datos incorporado que permite la grabación de 30 mediciones realizadas.

El equipo correntómetro, el cual permitió la realización de aforos en los ríos *Anya* y *Mchique*, es presentado en la Figura 15.



**Figura 15: Correntómetro FP111**

FUENTE: Elaboración propia

- **WatchDog 120 Rain Gauge (1 unid.)**

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 equipo 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/hr. El tipo de pluviómetro es el *tipping-bucket*, y se requiere del software SpecWare 8.0 para la descarga y manipulación de la información.

El pluviómetro WatchDog 120, el cual se encuentra en la estación Sincos, se presenta en la Figura 16.



**Figura 16: Estación minimeteorológica WatchDog 120**  
FUENTE: Elaboración propia

- **RG3-M Rain Gauge (3 unid.)**

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 mm/hr. El tipo de pluviómetro es el *tipping-bucket*, el cual se muestra en la Foto 2 del Anexo 5.

Para almacenar la información es necesario el Pendant Event Data Logger y para la extracción de esta el Optic USB Base Station. Se requiere del software HOBOWare 3.0 para la descarga y manipulación de la información. Dichos elementos se aprecian en las Fotos 3, 4 y 5 del Anexo 5. Asimismo, el pluviómetro RG3-M, el cual se encuentra en las estaciones *Tambo*, *Colpar* y *Quero*, se presenta en la Figura 17.



**Figura 17: Estación pluviométrica RG3-M**  
FUENTE: Elaboración propia

**- Wireless Vantage Pro2™ Plus (5 unid.)**

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 cm y cuenta con una resolución de 0.2 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.

El equipo meteorológico Wireless Vantage Pro 2, el cual se encuentra en las estaciones *Cruzpampa*, *Chacrampa*, *Quilcas*, *Yanamuelo* y *Molinos*, se presenta en la Figura 18. Asimismo, la Foto 7 del Anexo 5 muestra la estación meteorológica *Cruzpampa*, ubicada en el distrito de Sincos.



**Figura 18: Estación meteorológica Wireless Vantage Pro2™ Plus**  
FUENTE: Elaboración propia

**- Mini Diver D501 (2 unid.)**

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

El equipo Diver, el cual se encuentra cerca de las estaciones hidrométricas *Anya* y *Mchique*, se presenta en la Figura 19.



**Figura 19: Registrador automático Diver D501**  
FUENTE: Elaboración propia

**- Baro Diver (2 unid.)**

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, mientras que su batería incorporada le permite una duración de 10 años. Posee una precisión de medición de  $\pm 2$  cm H<sub>2</sub>O y una resolución de 0.1 cm H<sub>2</sub>O, y soporta un presión máxima de 15 m 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.

El equipo Baro Diver, el cual se encuentra cerca de las estaciones hidrométricas *Anya* y *Mchique*, se presenta en la Figura 20. El proceso de descargas de los datos del Diver y Baro diver de las estaciones Anya y Mchique se muestra en las Fotos 13 y 14 del Anexo 5.



**Figura 20: Registrador automático Baro Diver**  
FUENTE: Elaboración propia

- **GPS Garmin MAPS 60CSx (2 unid.)**

Equipo para el posicionamiento global, 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 planimétrica es menor a 10 m, la altimétrica es de 0.3048 m, y para el compás es de  $\pm 2^\circ$ . Cuenta con un formato de posición en coordenadas geográficas (latitud-longitud) o totales (UTM); 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. El equipo GPS Garmin MAPS 60CSx se presenta en la Figura 21.



**Figura 21: GPS Garmin MAPS 60CSx**  
FUENTE: Elaboración propia

- **Cámara fotográfica Canon PowerShot ELPH 100 HS (1 unid.)**

**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.
- R versión 3.0.2.
- Hec-HMS 3.5.
- MODSIM 8.3.2.
- Materiales de escritorio.

### **3.2. MÉTODOS**

#### **3.2.1. Descripción del comportamiento de la precipitación total diaria y caudales medios diarios**

***a. Análisis cartográfico y exploratorio de la información***

**Análisis cartográfico de las cuencas**

En esta etapa, se describieron los parámetros geomorfológicos de las cuencas en estudio, los cuales pueden clasificarse en: parámetros de relieve, de forma y de la red de drenaje. A continuación, se presentan los parámetros considerados en la geomorfología de las cuencas Anya y Mchique.

- ***Parámetros de relieve***

- ***Área de la cuenca***

Es probablemente la característica geomorfológica más importante. 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***

Es un parámetro importante, pues en conexión con el área 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 gran 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 puede dar una idea de la climatología de la región, basándose 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. Asimismo, 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***

Esta 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 12, mientras que el menor (l) del rectángulo es calculado mediante la ecuación 13:

$$L = \frac{Cc\sqrt{A}}{1.128} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{Cc} \right)^2} \right] \quad (12)$$

$$l = \frac{Cc\sqrt{A}}{1.128} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{Cc} \right)^2} \right] \quad (13)$$

Donde:

- Cc : Coeficiente de compactación.
- A : Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

#### - **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<sup>2</sup> 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<sup>2</sup> 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.

#### - **Coeficiente de masividad (Cm)**

El coeficiente de masividad se define como el cociente entre la pendiente media de la cuenca y su área. Se expresa mediante la ecuación 14.

$$Cm = \frac{Sc}{A} \quad (14)$$

Donde:

- $Cm$  : Coeficiente de masividad.
- $Sc$  : Pendiente media de la cuenca (m/km).
- $A$  : Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

- **Parámetros de forma**

- **Coeficiente 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 15.

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (15)$$

Donde:

- $Cg$  : Coeficiente de compacidad.
- $P$  : Perímetro de la cuenca (km).
- $A$  : Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

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

- **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 16.

$$FF = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (16)$$



Donde:

$FF$  : Factor de forma.

$A$  : Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

$L$  : 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 ( $L_c$ ) de la misma. La longitud  $L_c$  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 17.

$$Re = \frac{D}{L_c} = 1.1284 \frac{\sqrt{A}}{L_c} \quad (17)$$

Donde:

$Re$  : Relación de elongación.

$A$  : Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

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

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

#### - **Relación de circularidad**

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 18.

$$Rc = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (18)$$

Donde:

$Rc$  : Relación de circularidad.

$P$  : Perímetro de la cuenca (km).

$A$  : Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

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

- ***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 19.

$$S_C = \frac{(Cota_{nacimiento} - Cota_{salida})}{Longitud_{cauce}} \quad (19)$$

- ***Orden de la cuenca***

Es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca. Horton clasificó el orden de corrientes asignando el orden 1 a las más pequeñas, es decir, aquellas que no están ramificadas, el orden 2 a las corrientes que sólo tienen ramificaciones o tributarios de primer orden, de orden 3 aquellos con dos o más tributarios de orden 2 o menor etc.

- ***Frecuencia de corrientes***

Se define como el número de segmentos de corrientes por unidad de área. Se expresa mediante la ecuación 20.

$$F = \frac{Nu}{A} \quad (20)$$

Donde:

$F$  : Frecuencia de corrientes.

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

$A$  : Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

- ***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 21.

$$Dd = \frac{\sum L_i}{A} \quad (21)$$

Donde:

$Dd$  : Densidad de drenaje de la cuenca.

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

$A$  : Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

- ***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 22.

$$Lm = \frac{A}{4\sum L_i} = \frac{1}{4Dd} \quad (22)$$

Donde:

$Lm$  : Extensión media del escurrimiento.

$Dd$  : Densidad de drenaje de la cuenca.

- ***Coefficiente 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<sup>2</sup>). Se expresa mediante la ecuación 23.

$$Ct = \frac{Pp}{A} \quad (23)$$

Donde:

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

- ***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 24.

$$Rb = \frac{N_n}{N_{n+1}} \quad (24)$$

Donde:

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

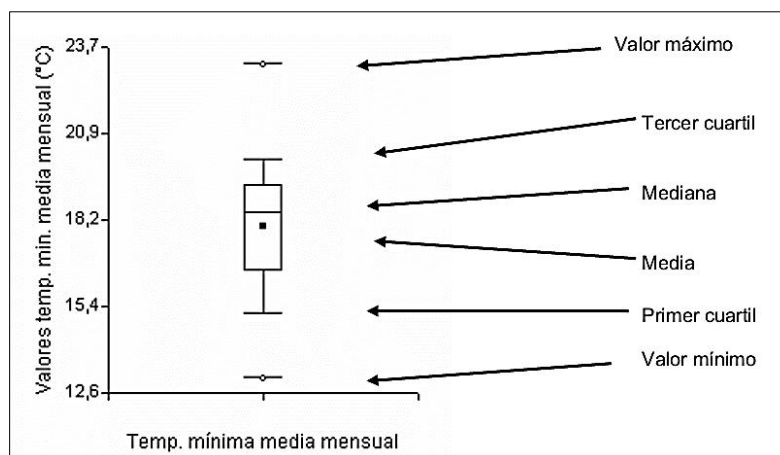
**Análisis exploratorio de datos**

En esta etapa, se realiza el análisis exploratorio de la información hidrometeorológica del período diciembre 2011 – junio 2013, cuya metodología consiste en el uso de técnicas generalmente gráficas, con algunas evaluaciones cuantitativas.

• ***Diagrama de cajas (Boxplot)***

Permite obtener información relativa a la concentración y variación de los datos. Cuando se obtienen varias de ellas permiten ilustrar los cambios en las medidas de concentración y

la variación entre conjuntos de datos. La Figura 22 muestra a detalle cada uno de los elementos característicos de un gráfico de cajas (Boxplot).



**Figura 22: Elementos del diagrama de cajas**

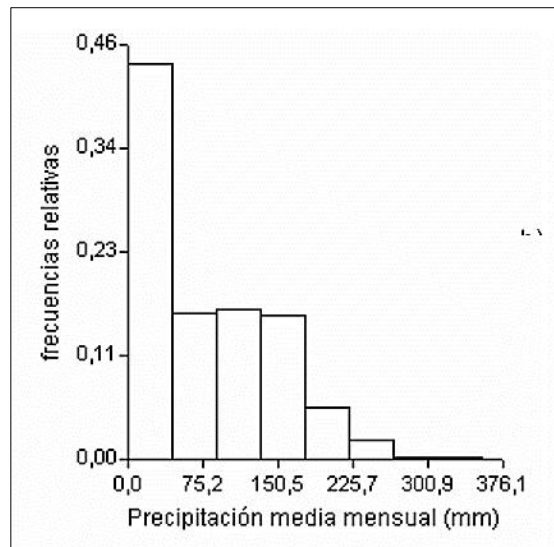
FUENTE: CAZALAC y PHI/UNESCO, s.f.

Las gráficas de cajas para las series de precipitación total diaria (*Tambo, Colpar, Quilcas, Cruzpapampa, Chacrampa y Sincos*), series de caudales medios diarios (*Anya y Mchique*), y series de evapotranspiración de referencia diaria (*Quilcas, Cruzpapampa*); se elaboraron considerando el periodo diciembre 2011 – junio 2013. Sin embargo, las estaciones complementarias (*Quero, Yanamucllo y Molinos*) sólo consideraron la data correspondiente al 2012.

- **Gráfico de histograma**

El propósito de los histogramas 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 23 muestra un gráfico de histogramas o gráfico de distribución frecuencias característico.



**Figura 23: 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*) y para las series de evapotranspiración de referencia diaria (*Quilcas y Chacrampa*); se elaboraron considerando el periodo diciembre 2011 – junio 2013. Sin embargo, las estaciones complementarias (*Quero, Yanamucllo y Molinos*) sólo consideraron la data correspondiente al 2012.

- **Identificación de valores atípicos (outliers)**

Los valores atípicos son observaciones con características diferentes de las demás. Este tipo de valores no pueden ser caracterizados categóricamente como benéficos o problemáticos, sino que deben ser contemplados en el contexto del análisis y debe evaluarse el tipo de información que pueden proporcionar.

Para la identificación de valores atípicos, se siguió la metodología propuesta por Tukey (1977):

- Se calcula el rango intercuartil (RI) de la muestra a analizar según la ecuación 25:

$$RI = Q3 - Q1 \quad (25)$$

Donde:

RI : Rango intercuartil

Q1 : Tercer cuartil (75%)

Q3 : Primer cuartil (25%)

- Posteriormente, se calcula el paso intercuartil, el cual está dado por la ecuación 26:

$$Paso = 1.5 * RI \quad (26)$$

- Finalmente, se calculan las cercas internas (superior e inferior) y externas (superior e inferior), mediante las ecuaciones 27 a 30:

$$C_{Li} = Q1 - Paso \quad (27)$$

$$C_{Ls} = Q3 + Paso \quad (28)$$

$$C_{Ei} = Q1 - 2 * Paso \quad (29)$$

$$C_{Es} = Q3 + 2 * Paso \quad (30)$$

Donde:

$C_{Li}$  : Cerca interna inferior.

$C_{Ls}$  : Cerca interna superior.

$C_{Ei}$  : Cerca externa inferior.

$C_{Es}$  : Cerca externa superior.

Los valores ubicados entre la media y las cercas internas (inferior y superior) son denominados *adyacentes*, los valores entre las cercas internas y las cercas externas son considerados como *alejados* y los valores ubicados fuera de las cercas externas (inferior y superior) son considerados como *muy alejados*. Los valores ubicados fuera de las cercas externas son por lo general considerados como valores *atípicos (outliers)*.

La identificación de los valores atípicos se realizó sólo para las series de caudales medios diarios del período diciembre 2011 – junio 2013.

- ***Estadísticas descriptivas***

Una vez realizado el análisis exploratorio de datos de forma gráfica, para las series de precipitación, caudal y evapotranspiración; se procedió a determinar sus estadísticas descriptivas, la cual consistió en el cálculo de las medidas de tendencia central (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, es afectado por 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 dispersión***

- *Desviación estándar*; 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.

***Inventario de los recursos hídricos***

En esta etapa, se realiza un reconocimiento de los recursos hídricos en las cuencas Anya y Mchique, el cual consistió en el recorrido e inspección de las cuencas a fin de determinar los volúmenes de aporte, tipo de uso y estado de fuentes hídricas como ríos, riachuelos, manantiales, canales, acequias, etc. El inventario de las cuencas Anya y Mchique tuvo las siguientes consideraciones:

- Se realizó en épocas de estiaje, a fin de facilitar el recorrido de las cuencas, desde la cabecera hasta el punto de aforo.



- Se consideró la toma de datos correspondientes al uso, estado, volumen aportado, ubicación geográfica y ubicación política.
- El inventario de cada una fuentes estuvo acompañado de un registro fotográfico, a fin de facilitar la construcción de una base de datos.
- Se priorizó el inventario de fuentes con mayor aporte hídrico.
- El caudal de aporte de las fuentes, como manantiales, se estimó mediante aforos volumétricos.

El inventario de las fuentes de agua en la cuenca del Mchique se realizó durante el periodo abril 2011 – mayo 2011, mientras que el inventario de la cuenca Anya se llevó a cabo durante el periodo agosto 2012 – setiembre 2012. La Figura 24 y la Figura 25 muestran el proceso de aforo volumétrico de los manantiales, mientras que la Figura 26 muestra una de las captaciones para uso poblacional.



**Figura 24: Proceso de aforo volumétrico, inventario de la cuenca Anya**  
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 25: Proceso de aforo volumétrica, inventario de la cuenca Anya**  
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 26: Captación para uso poblacional, inventario de la cuenca Anya**  
FUENTE: Elaboración propia

### ***b. Hidrometeorología***

#### **Pluviometría**

- ***Procesamiento pluviométrico***

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

- El registro automático de los pluviómetros correspondió a un intervalo de registro de 15 minutos.
- La descarga de datos se realizó mensualmente, de acuerdo a estaciones ubicadas en una misma cuenca hidrográfica, tal como se aprecia en la Foto 6 del Anexo 5.
- El recorrido para la descarga de datos fue realizada desde las estaciones ubicadas a mayor altitud hasta las ubicadas a menor altitud.
- El procedimiento de descarga de la data comprendió la verificación de los niveles de las baterías; la inspección gráfica de la data descargada; la verificación de la correcta configuración de los registradores automáticos; y, finalmente, el visto bueno de los equipos pluviométricos y meteorológicos para el registro de datos en los meses siguientes.

- ***Análisis espacial de la media y varianza de la precipitación diaria***

Esta etapa, se realizó a partir del cálculo de las medias y varianzas para cada una de las series de precipitación diaria del 2012; para las estaciones *Tambo*, *Colpar*, *Quilcas*, *Cruzpampa*, *Chacrampa*, *Sincos*, *Yanamuelo*, *Quero* y *Molinos*. Asimismo, dichos valores

se plotearon espacialmente según la ubicación de cada una de las respectivas estaciones, y comparados en relación a sus cotas y la precipitación total anual del 2012.

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

Es una medida del grado de relación que guardan dos variables, y una buena herramienta estadística para comprobar si, a priori, un conjunto de datos mantiene algún tipo de dependencia lineal. La expresión matemática de la correlación lineal de Pearson se muestra en la ecuación 31.

$$r_{xy} = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (31)$$

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.

El valor del coeficiente de correlación ( $r$ ) varía entre  $-1$  y  $1$ ; toma el valor de  $1$  en el caso de una correlación completa positiva, cuyos datos describen una perfecta línea recta con pendiente positiva, con  $x$  e  $y$  aumentando conjuntamente. El valor de  $r=1$  es independiente de la magnitud de la pendiente. En cambio, si los datos describen una perfecta línea recta con pendiente negativa, con  $y$  decreciendo cuando  $x$  aumenta, el coeficiente  $r$  toma el valor de  $-1$ , denominándose una correlación completa negativa. Un valor de  $r$  cercano a cero indica que las variables  $x$  e  $y$  no están correlacionadas linealmente.

- ***Significancia estadística***

Es necesario evaluar la significancia estadística dado un cierto coeficiente de correlación  $r_{xy}$  obtenido, comprobando si dicho coeficiente se encuentra dentro de la distribución muestral especificada por la hipótesis nula (no correlación). En otras

palabras, la significancia estadística viene a ser la “probabilidad” de que dos variables no estén correlacionadas.

A efectos prácticos, se calcula el número de desviaciones tipo que se encuentran en el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la ecuación 32. Se compara el valor del estadístico  $t$  obtenido, con el existente en las tablas, para un nivel de significación  $\alpha$  y  $n-2$  grados de libertad.

$$t = r_{xy} \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{xy}^2}} \quad (32)$$

Donde:

- $t$  : Estadístico  $t$  de Student.
- $r_{xy}$  : Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables  $x$  e  $y$ .
- $n$  : Tamaño de la muestra.

El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) se obtuvo en una matriz de correlaciones de la información pluviométrica diaria del 2012, para las estaciones *Tambo*, *Colpar*, *Quilcas*, *Cruzpampa*, *Chacrampa*, *Sincos*, *Yanamuelo*, *Quero* y *Molinos*; cuya matriz es la data de entrada para el análisis de componentes principales.

- ***Análisis de componentes principales***

En esta etapa, se determinaron los componentes (factores) que expliquen la mayor parte de la varianza total. El primer factor o componente sería aquel que explica una mayor parte de la varianza total, el segundo factor sería aquel que explica la mayor parte de la varianza restante, es decir, de la que no explicaba el primero y así sucesivamente. Por otro lado, antes de realizar el análisis de componentes principales, debe comprobarse la utilidad del mismo, mediante la aplicación de los test mencionados a continuación.

- ***Análisis de la determinante***

Una determinante muy baja indicará altas intercorrelaciones entre las variables, pero no debe ser cero (matriz no singular), pues esto indicaría que algunas de las variables

son linealmente dependientes y no se podrían realizar ciertos cálculos necesarios en el Análisis Factorial.

- **Test de esfericidad de Bartlett**

Comprueba que la matriz de correlaciones se ajuste a la matriz identidad (I), es decir ausencia de correlación significativa entre las variables. Esto significa que la nube de puntos se ajustará a una esfera perfecta, expresando así la hipótesis nula por:  $H_0: R=I$ , es decir, que el determinante de la matriz de correlaciones es 1.  $H_0: |R| = 1$ . Se expresa mediante la ecuación 33.

$$X^2 = - \left( n - 1 - \frac{1}{6} * (2 * v + 5) \right) * \ln |R| \quad (33)$$

Donde:

- $n$  : Tamaño de la muestra.
- $v$  : Número de variables.
- $R$  : Matriz de correlaciones.

Si se acepta la hipótesis nula ( $p > 0.05$ ) significa que las variables no están intercorrelacionadas y por tanto no tiene mucho sentido llevar a cabo un análisis de componentes principales.

- **Índice KMO de Kaiser-Meyer-Olkin**

Es muy útil cuando el tamaño de la muestra es muy pequeño. Se expresa mediante la ecuación 34.

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum a_{ij}^2} \quad (34)$$

Donde:

- $r_{ij}$  : Correlación simple.
- $a_{ij}$  : Correlación parcial.

Valores bajos del índice KMO no aconsejan la utilización del análisis factorial. La Tabla 6 permite interpretar el índice KMO según el valor que éste adopte.

**Tabla 6: Interpretación del Índice KMO**

Rango	Utilización
$1 \geq KMO > 0.9$	Muy bueno
$0.9 \geq KMO > 0.8$	Meritorio
$0.8 \geq KMO > 0.7$	Mediano
$0.7 \geq KMO > 0.6$	Mediocre
$0.6 \geq KMO > 0.5$	Bajo
$KMO \leq 0.5$	Inaceptable

FUENTE: Urrutia y Palomino, 2010

Finalmente, el análisis de componentes principales se realizó para la data de la precipitación diaria del 2012; considerando las estaciones pluviométricas *Tambo, Colpar, Quilcas, Cruzpampa, Chacrampa, Sincos, Quero, Yanamucllo y Molinos*.

- **Curva de distribución acumulada**

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

Siguiendo la metodología propuesta por Tukey (1977), se determinaron los números de clase mediante la ecuación 35, y los anchos de clase mediante la ecuación 36; para cada una de las estaciones pluviométricas.

$$N^{\circ} \text{ clase} = 1.33 \cdot \ln(n) + 1 \quad (35)$$

$$\text{Ancho de clase} = \frac{(P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}})}{(N^{\circ} \text{ clase} - 1)} \quad (36)$$

Las curvas de distribución acumulada de la precipitación diaria se elaboraron para las estaciones *Tambo, Colpar, Quilcas, Cruzpampa, Chacrampa, Sincos, Yanamucllo, Quero y Molinos*; considerando el periodo del 2012.

## Hidrometría

### • *Procesamiento hidrométrico*

La información hidrométrica se obtuvo 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 se realizó a través de la lectura de las reglas limnimétricas instaladas (Fotos 11 y 12 del Anexo 5), para el periodo diciembre 2011 – junio 2013; los cuales tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Mínimo 03 lecturas diarias de las reglas limnimétricas; a las 7, 17 y 22 horas de cada día.
- En algunos casos, sólo se realizaron 02 lecturas de la regla limnimétrica, 7 y 17 horas.
- A fin de controlar la veracidad de las lecturas tomadas por los técnicos de campo, todas lecturas fueron corroboradas con sus respectivas fotografías.
- La limpieza del cauce de los ríos se controló 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, se instaló dos registradores automáticos (Fotos 13 y 14 del Anexo 5) en los ríos Anya y Mchique, con la finalidad de obtener mayor densidad de la información hidrométrica, y contrastar la data obtenidas con las lecturas de las reglas limnimétricas.

### • *Extrapolación logarítmica*

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 37. Los valores a obtenerse por el ajuste del método son  $H_0$ ,  $a$  y  $b$ .

$$Q = a * (H - H_0)^b \quad (37)$$

Donde:

- $Q$  : Caudal ( $m^3/s$ ).
- $a, b$  : Constantes propias de la expresión analítica.
- $H$  : Altura de la escala hidrométrica para la cual se quiere conocer ( $m^3/s$ ).
- $H_0$  : Altura de la escala hidrométrica para la cual  $Q = 0 m^3/s$ .

La extrapolación logarítmica permitió la construcción de las respectivas curvas de calibración de las estaciones hidrométricas Anya y Mchique, para el periodo diciembre 2011 – junio 2013.

- ***Índice de crecida***

Se define como el cociente entre el caudal instantáneo máximo y el caudal promedio de la crecida. Este índice se calculó para los ríos Anya y Mchique, considerando el periodo de crecidas (noviembre – abril).

- ***Análisis de persistencia***

El análisis de persistencia se realizó tanto para la precipitación total diaria como para los caudales medios diarios de las cuencas Anya y Mchique, mediante la distribución de probabilidad *Weibull*, expresada mediante la ecuación 38.

$$P(X > x) = \frac{m}{n+1} \quad (38)$$

Donde:

- $P(X > x)$ : Probabilidad de excedencia.
- $m$  : Rango de datos.
- $n$  : Número de datos del registro.

Posteriormente, se obtuvo la curva de distribución teórica de cada serie, obteniéndose los valores de precipitación diaria y caudal medio diario al 75 y 95% de persistencia. Se consideró el periodo seco (mayo 2012 – agosto 2012) y el periodo de lluvias (setiembre 2012 – abril 2013); mientras que para los caudales medios diarios, una época de estiaje (mayo 2012 – octubre 2012) y una época de crecidas (noviembre 2012 – abril 2013).



### Evapotranspiración de referencia

- **CIMIS Penman**

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, que usa la ecuación de Penman Monteith y le adiciona una función del viento. Este método 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 diaria 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 neta ( $W/m^2$ ).

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

$U$  : Media horaria de la velocidad del viento a 2 metros de la superficie (m/s)

$Z$  : Elevación de la estación meteorológica (msnm).

Cabe mencionar que la radiación neta es la diferencia entre la radiación entrante y saliente, de longitudes de onda corta y larga (FAO, 2006). También, es el equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre o la diferencia de la radiación neta de onda corta entrante y la radiación neta de onda larga saliente.

- Determinar la media horaria de la presión de saturación de vapor ( $es$ ) en kPa, mediante la ecuación 39.

$$es = 0.6108 \left( \frac{17.27T}{T+237.3} \right) \quad (39)$$

Donde:

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

- Determinar el déficit medio horario de la presión de vapor (VPD), mediante la ecuación 40.

$$VPD = es - ea \quad (40)$$

Donde:

$ea$  : Media horaria de la presión de vapor (kPa).

- Determinar la pendiente de vapor de saturación vs. la curva de temperatura del aire, mediante la ecuación 41.

$$DEL = \frac{4099es}{(T+237.3)^2} \quad (41)$$

Donde:

$T$  : Media horaria de la temperatura del aire (°C)

- Calcular la presión barométrica media horaria (P), mediante la ecuación 42.

$$P = 101.3 - 0.0115Z + 5.44 \cdot 10^{-7} \cdot Z^2 \quad (42)$$

Donde:

$Z$  : Elevación de la estación meteorológica (msnm).

- Determinación de la constante psicométrica GAM (psychrometer constant) en kPa/°C, mediante la ecuación 43.

$$GAM = 0.000646(1 + 0.000946T)P \quad (43)$$

Donde:

$T$  : Media horaria de la temperatura del aire (°C)

$P$  : Presión barométrica media horaria (kPa).

- Determinar de la función de ponderación W (weighting function), mediante la ecuación 44.

$$W = \frac{DEL}{DEL+GAM} \quad (44)$$

Donde:

$DEL$  : Pendiente de vapor de saturación vs. la curva de temperatura del aire.

$GAM$  : Constante psicométrica.

- Calcular la función del viento  $FU_2$ , mediante las ecuaciones 45 y 46.

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

$$FU_2 = 0.125 + 0.0439U \quad (45)$$

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

$$FU_2 = 0.030 + 0.0576U \quad (46)$$

Donde:

$U$  : Media horaria de la velocidad del viento a 2 metros de la superficie (m/s).

$Rn$  : Media horaria de la radiación solar neta ( $W/m^2$ ).

- Convertir la media horaria de la radiación neta ( $Rn$ ), de  $W/m^2$  a mm, mediante la ecuación 47.

$$NR = \frac{Rn}{[694.5 \cdot (1 - 0.000946T)]} \quad (47)$$

Donde:

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

- Calcular la Eto horaria, la cual es aproximadamente igual a  $RET_i$ , mediante la ecuación 48.

$$RET_i = W \cdot NR + (1 - W)VPD \cdot FU_2 \quad (48)$$

Donde:

$W$  : Función de ponderación.

$NR$  : Media horaria de la radiación neta (mm).

$VPD$  : Déficit medio horario de la presión de vapor (kPa).

$FU_2$  : Función de viento.

- 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 49.

$$Eto_{diaria} = \sum_{i=1}^{24} RET_i \quad (49)$$

Donde:

$RET_i$  : Aproximación a la Eto horaria (mm).

Los valores de evapotranspiración de referencia diaria de las cuencas Anya y Mchique se estimaron a partir de la data climática horaria de las estaciones meteorológicas automáticas *Quilcas* y *Chacrampa*, respectivamente; para el periodo diciembre 2011 – junio 2013.

### **3.2.2. Determinación del balance hídrico**

En esta etapa, se realizó el balance hídrico en situación actual de las cuencas Anya y Mchique (diciembre 2011 – junio 2013), a escala diaria, teniendo en cuenta la información recogida en el inventario de fuentes de agua de cada una de las cuencas.

#### ***a. Oferta hídrica***

Estuvo conformada, principalmente, por los caudales medios diarios de los ríos Anya y Mchique, obtenidos a partir de las lecturas de las respectivas reglas limnimétricas. Asimismo, consideró el aporte de los principales manantiales de las cuencas, para lo cual se realizó el inventario de las fuentes de agua superficiales de las cuencas Anya y Mchique.

#### ***b. Demanda hídrica***

Son demandas de agua actualmente utilizadas, en diferentes usos, en las cuencas Anya y Mchique. Es necesario precisar que en estas cuencas, se distinguen varios tipos de usos actuales de agua superficial; siendo en orden de prioridad, por la magnitud de volumen consumido: uso agrícola, pecuario, poblacional; sin considerar el volumen no consuntivo necesario para satisfacer la demanda ecológica.

### **Demanda de uso consuntivo**

- ***Demanda agrícola***

En esta etapa se estimó la demanda hídrica en agricultura, la cual se define como la cantidad de agua necesaria para que los cultivos desarrollen su máximo potencial productivo, en función de la cantidad de agua necesaria para el desarrollo de sus procesos fisiológicos (respiración y fotosíntesis), manteniendo los otros factores de producción constantes.

Debido a que en ambas cuencas se practica predominantemente una agricultura por seco y minoritariamente una agricultura bajo riego, la demanda agrícola actual se estimó mediante el análisis de la evapotranspiración de los cultivos, así como la elaboración de las cédulas de cultivo para las áreas bajo riego. Las cédulas de cultivo para las superficies en seco fueron elaboradas posteriormente, para ser utilizadas en el análisis de escenarios futuros de balance hídrico.

- ***Superficie de cultivo***

Se determinó a través de la información agrícola recopilada para los distritos de Quilcas, Saño y Sincos; a partir de la base de datos del IV Censo Nacional Agrario - CENAGRO (INEI y MINAGRI, 2013). Dicha información se contrastó con la información de campo obtenida durante el periodo de estudio.

- ***Cédula de cultivo***

Se determinó a través de la información agrícola correspondiente a los distritos de Quilcas, Saño y Sincos, a partir de la base de datos del IV Censo Nacional Agrario - CENAGRO (INEI y MINAGRI, 2013). Dicha información se contrastó con la información de campo obtenida durante el periodo diciembre 2011 – junio 2013. Las cédulas de cultivo elaboradas, para las superficies bajo riego y en seco, tuvieron como año de referencia las siembras del 2012. Las fechas de siembra y cosecha se estimaron mediante la inspección de campo.

- ***Coefficiente de cultivo***

Los coeficientes  $K_c$  se determinaron en base a los valores propuestos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2006), y el “Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes Centrales Peruanos” elaborado por el proyecto Pronóstico Estacional de Lluvias y Temperaturas en la Cuenca del Río Mantaro para su Aplicación en la Agricultura (IGP, 2010). El  $K_c$  para cada cultivo, a nivel diario, se obtuvo mediante la determinación de la curva de mejor ajuste según la duración del periodo vegetativo del cultivo.

Metodológicamente, el coeficiente de cultivo ponderado ( $K_{cp}$ ), a nivel diario, resultó de multiplicar cada coeficiente  $K_c$  por su respectiva área cultivada en un día “ $d_i$ ”, y dividido por la superficie total cultivada en el mismo día; en forma similar se obtienen los valores para los días restantes.

- ***Evapotranspiración de referencia (Eto)***

Se determinó, a nivel diario, mediante el método de Penman Monteith modificado (CIMIS), a partir de la información climática horaria registrada en las estaciones meteorológicas *Quilcas* y *Cruzpampa*.

- ***Evapotranspiración del cultivo (Etc)***

Se obtuvo multiplicando el coeficiente de cultivo ponderado ( $K_{cp}$ ) del día “ $d_i$ ” con la evapotranspiración de referencia del mismo día. La ecuación 50 expresa el cálculo de la evapotranspiración de cultivo.

$$Etc = K_{cp} \cdot Eto \quad (50)$$

Donde:

$Etc$  : Evapotranspiración del cultivo en (mm).

$K_{cp}$  : Coeficiente del cultivo ponderado.

$Eto$  : Evapotranspiración de referencia (mm).

- **Precipitación efectiva ( $P_{ef}$ )**

Es aquella fracción de la precipitación total que se infiltra en el suelo, sin llegar a perderse por escorrentía, percolación profunda o evaporación, y permanece a disposición de las raíces de las plantas. Depende de múltiples factores tales como la intensidad de la precipitación, aridez del clima, inclinación del terreno, contenido de humedad del suelo y velocidad de infiltración.

Para la determinación de la precipitación efectiva se empleó el método propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), el cual es el más recomendado por FAO. Se expresa mediante la ecuación 51 ó 52, según los criterios siguientes:

- Para  $P_i \leq 250\text{mm/k}$  ; entonces:

$$P_{ef_i} = \frac{P_i}{125} \cdot (125 - 0.2 \cdot k \cdot P_i) \quad (51)$$

- Para  $P_i > 250\text{mm/k}$  ; entonces:

$$P_{ef_i} = \frac{125}{k} + 0.1P_i \quad (52)$$

Donde:

$P_{ef_i}$  : Precipitación efectiva en el día  $i$  (mm).

$k$  : Factor de corrección a nivel diario ( $k=30$  días).

$P_i$  : Precipitación en el día  $i$  (mm).

- **Demanda hídrica neta**

Es la cantidad de agua que se debe aplicar durante el riego, con el fin de cubrir el agua que ha utilizado el cultivo durante la evapotranspiración. Se obtiene a través de la diferencia entre la evapotranspiración de cultivo ( $E_{tc}$ ) y la precipitación efectiva ( $P_{ef}$ ). Se expresa mediante la ecuación 53.

$$L_n = E_{tc} - P_{ef} \quad (53)$$

Donde:

$L_n$  : Lámina de riego neta (mm).

$E_{tc}$  : Evapotranspiración del cultivo (mm).

$P_{ef}$  : Precipitación efectiva (mm).

Las láminas de riego netas a nivel diario, y sus respectivas superficies, se determinaron, a nivel diario, para el periodo diciembre 2011 – junio 2013.

#### - ***Eficiencia de riego***

Es la relación o porcentaje entre el volumen de agua efectivamente utilizado por las plantas y el volumen de agua de la fuente de captación. Del volumen de agua de la fuente de captación de un sistema de riego, una parte importante no es utilizada por las plantas. Las pérdidas pueden ser en el sistema de conducción, distribución y aplicación; por infiltración, evaporación, fugas y operación errada de compuertas. Las pérdidas de agua en el interior de la parcela pueden ser por las técnicas de riego utilizadas y las características geomorfológicas de la parcela y el suelo. En el presente estudio, la eficiencia de riego se consideró del 30% para las cuencas Anya y Mchique, de acuerdo a las condiciones de infraestructura de riego (tomas, canales, acequias y compuertas) y el método de riego aplicado.

#### - ***Demanda hídrica bruta***

Es la cantidad total de agua que se tiene que dotar durante el riego. Se obtuvo a través de la relación entre la lámina de riego neta y la eficiencia de riego. La ecuación que determina la demanda bruta se expresa mediante la ecuación 54.

$$L_b = \frac{L_n}{E_r} \cdot 100 \quad (54)$$

Donde:

$L_b$  : Lámina de riego bruta (mm).

$L_n$  : Lámina de riego neta (mm).

$E_r$  : Eficiencia de riego (%).



La demanda hídrica bruta de las superficies bajo riego, de ambas cuencas en estudio, se determinó considerando el periodo diciembre 2011 – junio 2013. Por otro lado, la demanda bruta de las superficies en seco se determinó posteriormente, para el análisis de escenarios futuros de balance hídrico.

- ***Demanda poblacional***

Se estimó en base a las siguientes consideraciones generales: el abastecimiento de agua considera las áreas urbanas y centros poblados de los distritos comprendidos dentro de las cuencas en estudio, la dotación diaria por habitante fue tomada del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE, 2009). Los datos poblacionales se tomaron del Boletín especial N°18 “PERÚ: Estimaciones y proyecciones de la población por sexo, según Departamento, Provincia y Distrito, 2000 – 2015”, elaborado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2009).

La Tabla 7 presenta la población de los distritos comprendidos dentro de la cuenca del río Anya.

**Tabla 7: Población de los distritos de Quilcas y Saño**

Distrito	Población 2011	Población 2012	Población 2013
	N° hab.	N° hab.	N° hab.
Quilcas	4195	4197	4194
Saño	4006	4011	4016

FUENTE: INEI, 2009

Adicionalmente a ello, se consideró una población media de 1004 habitantes para el centro poblado de Casacancha; ubicado en la cuenca Anya y perteneciente a la jurisdicción del distrito de Ingenio.

La Tabla 8 presenta la población de los distritos comprendidos dentro de la cuenca del río Mchique.

**Tabla 8: Población del distrito de Sincos**

Distrito	Población 2011	Población 2012	Población 2013
	N° hab.	N° hab.	N° hab.
Sincos	4738	4756	4772

FUENTE: INEI, 2009

- ***Demanda pecuaria***

Es el volumen de agua necesario para satisfacer las necesidades hídricas de los animales. El abastecimiento de agua para uso pecuario se estimó a partir del número de animales y el consumo unitario de cada uno. El número de animales se determinó en base a la información recogida del IV Censo Nacional Agrario - CENAGRO (INEI y MINAGRI, 2013), de acuerdo a la información pecuaria para los distritos de Quilcas, Saño y Sincos.

La Tabla 9 muestra la población pecuaria considerada en la cuenca del río Anya.

**Tabla 9: Población pecuaria de la cuenca Anya**

<b>Especie animal</b>	<b>Categoría</b>	<b>Total</b>
Ganado Vacuno	Terneros(as)	106
	Vaquillas	34
	Vaquillonas	46
	Vacas	337
	Toretas	62
	Toros	221
Ganado Ovino	Corderos(as)	1190
	Borregillas	622
	Borregas	1806
	Carnerillos	711
	Carneros	1980
	Capones	57
Ganado Porcino	Lechones	101
	Gorrinas	24
	Marranas	31
	Gorrinos	45
	Verracos	65
Alpacas	Crías	47
	Tuis hembras	149
	Madres	66
	Tuis macho	116
	Padrillos	33
	Capones	11
Aves	Pollos de engorde	290
	Gallinas	732
	Gallos	88
	Pavos	11
	Patos	22
Otros	Cabras	38
	Llamas lanudas	834
	Llamas peladas	585
	Caballos, potros y yeguas	62
	Burros, burras y mulas	182
	Conejos	34
	Cuyes	5686

FUENTE: INEI y MINAGRI, 2013

La Tabla 10 muestra la población pecuaria considerada en la cuenca del río Mchique.

**Tabla 10: Población pecuaria de la cuenca Mchique**

<b>Especie animal</b>	<b>Categoría</b>	<b>Total</b>
Ganado Vacuno	Terneros(as)	574
	Vaquillas	145
	Vaquillonas	75
	Vacas	965
	Toretas	185
	Toros	437
	Bueyes	2
Ganado Ovino	Corderos(as)	955
	Borregillas	457
	Borregas	1791
	Carnerillos	351
	Carneros	709
	Capones	10
Ganado Porcino	Lechones	389
	Gorrinas	64
	Marranas	186
	Gorrinos	60
	Verracos	46
Alpacas	Crías	1
	Capones	2
Aves	Pollos de engorde	811
	Gallinas	1657
	Gallos	152
	Pavos	22
	Patos	41
Otros	Cabras	2
	Llamas lanudas	1
	Llamas peladas	1
	Caballos, potros y yeguas	63
	Burros, burras y mulas	635
	Conejos	109
	Cuyes	5653

FUENTE: INEI y MINAGRI, 2013

### **Demanda de uso no consuntivo**

- ***Demanda ecológica***

Se estimó conforme las disposiciones establecidas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA); según el “Memorando Múltiple 018-ANA-2012-DCPRH-ERH-SUP”, el cual establece como metodología de trabajo, lo siguiente: “Para cursos de agua con caudales medios anuales menores a 20 m<sup>3</sup>/s, el caudal ecológico será como mínimo el 10% del caudal medio mensual para la época de avenida, y para la época de estiaje será de un 15% del caudal medio mensual”.

### **Demanda hídrica total**

La demanda hídrica total actual a escala diaria, para el periodo diciembre 2011 – junio 2013, se determinó mediante la suma de las demandas de uso consuntivo y no consuntivo. Se expresa mediante la ecuación 55.

$$d_{total,i} = d_{agr,i} + d_{pec,i} + d_{pobl,i} + d_{eco,i} \quad (55)$$

Donde:

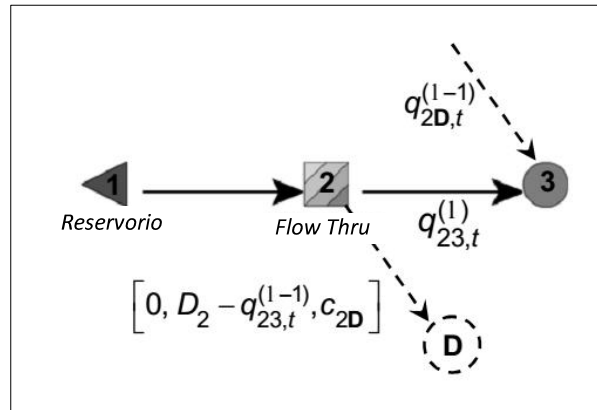
- $d_{total,i}$  : Demanda hídrica total para el día i.
- $d_{agr,i}$  : Demanda hídrica agrícola para el día i.
- $d_{pec,i}$  : Demanda hídrica pecuaria para el día i.
- $d_{pobl,i}$  : Demanda hídrica poblacional para el día i.
- $d_{eco,i}$  : Demanda hídrica ecológica para el día i.

### ***c. Balance hídrico actual***

El balance diario de las cuencas Anya y Mchique se determinó a partir de la construcción de los esquemas hidráulicos de ambas cuencas, y el contraste de la oferta y demanda hídrica. El modelo MODSIM permitió establecer prioridades para cada demanda hídrica. Los esquemas hidráulicos las cuencas en estudio (Figura 28 y Figura 29) toman en cuenta la satisfacción del caudal ecológico a través del nodo *Flow Thru* de MODSIM.

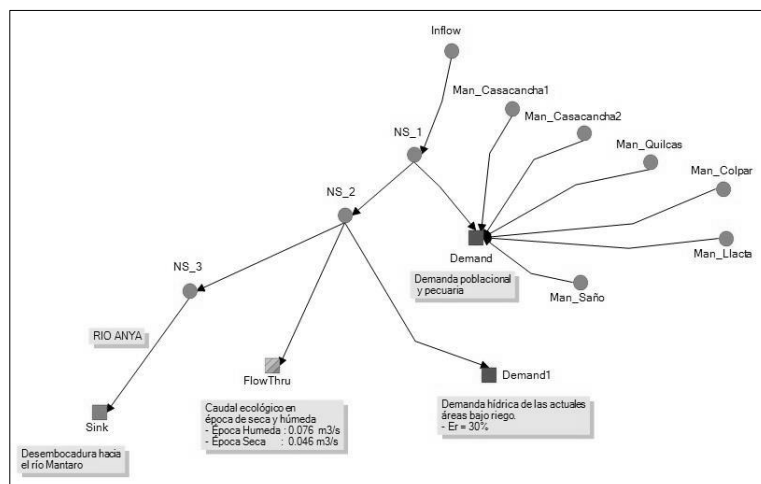
El nodo *Flow Thru* de MODSIM es un tipo de nodo de demanda, específica para usos no consuntivos; es diseñado para mantener ciertos caudales en los ríos, cuyos requerimientos

sean prioritarios para fines ambientales, ecológicos o de navegación. Como se ilustra en la Figura 27, el nodo *Flow Thru* opera iterativamente, removiendo flujo de la red como una demanda consuntiva; sin embargo, éste flujo es reemplazado luego en uno o más nodos en la siguiente iteración.

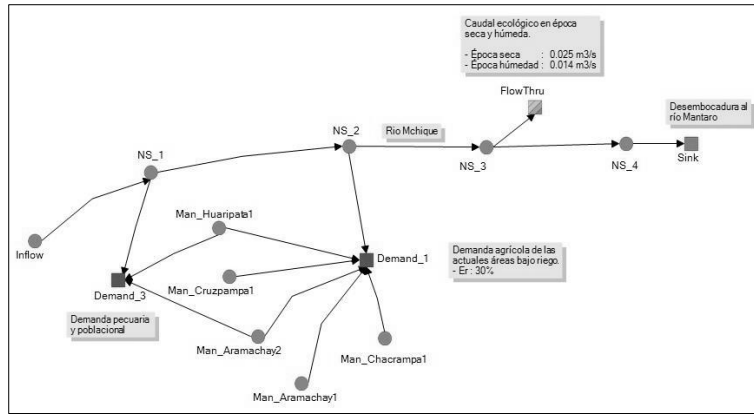


**Figura 27: Ilustración del nodo Flow Thru de MODSIM**  
FUENTE: Labadie, 2010

Las demandas agrícolas, poblacionales y pecuarias se consideraron como nodos diferentes; debido a que los manantiales abastecen, en su mayoría, a las demandas poblacionales y pecuarias, mas no, a las demandas agrícolas. La demanda agrícola se consideró forma global o totalizada, puesto que sólo representan un 25.47 y 16.68% del total de áreas cultivadas en las cuencas Anya y Mchique, respectivamente.



**Figura 28: Esquema hidráulico de la cuenca del río Anya**  
FUENTE: Elaboración propia



**Figura 29: Esquema hidráulico de la cuenca del río Mchique**  
FUENTE: Elaboración propia

### 3.2.3. Simulación del comportamiento hidrológico de las cuencas

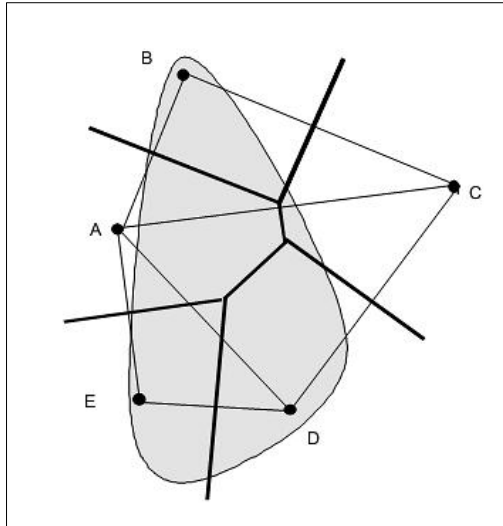
#### a. Modelo hidrológico

En esta etapa, se elaboró el modelo determinístico Hec-HMS de las cuencas Anya y Mchique; cuya calibración y validación se realizó usando los caudales medios diarios del periodo enero 2012 – diciembre 2012 y enero 2013 – junio 2013, respectivamente. Asimismo, se consideró variables de ingreso como (a) la precipitación y (b) la evapotranspiración; así como, procesos de (c) simulación de las pérdidas, (d) transformación precipitación-escorrentía, (e) tránsito de caudales y (f) flujo base.

#### Modelo de precipitación

Se determinó la precipitación media diaria de las cuencas Anya y Mchique mediante el método de los polígonos de Thiessen, el cual distribuye la precipitación según el área de influencia de cada estación pluviométrica; considerando que la precipitación es constante al interior de cada una de estas áreas o polígonos. Se expresa mediante la ecuación 56 y se ilustra en la Figura 30.

$$\overline{Pp} = \frac{1}{A} \sum_i a_i \cdot Pp_i \quad (56)$$



**Figura 30: Polígonos de Thiessen**  
 FUENTE: US Army Corps of Engineers, 2000

Los polígonos de Thiessen se elaboraron a través de la determinación del área de influencia de las estaciones *Tambo*, *Colpar* y *Quilcas* (cuenca Anya), y *Cruzpampa*, *Chacrampa* y *Sincos* (cuenca Mchique). En base a ello, se obtuvo una matriz de pesos para las cuencas Anya y Mchique, las cuales son presentadas en el Cuadro 7 y el Cuadro 8, respectivamente.

**Cuadro 7: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Anya**

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

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 8: Matriz de pesos, estaciones y subcuencas del río Mchique**

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

FUENTE: Elaboración propia



### Modelo de evapotranspiración de referencia

El modelamiento continuo del modelo Hec-HMS considera la evapotranspiración de referencia ( $E_t$ ) como variable de ingreso, a nivel mensual (mm/mes); para lo cual, se realizó la sumatoria de los valores de evapotranspiración de referencia diaria, para cada mes del periodo de calibración y validación, respectivamente.

La evapotranspiración es modelada en Hec-HMS sólo si no ocurre precipitación; es decir, asume *cero* la evapotranspiración durante periodos de lluvias, en los demás casos, dicha demanda es satisfecha, en primer lugar, del almacenamiento en la intercepción de la cobertura vegetal, depresiones superficiales y, finalmente, del almacenamiento de la zona superior del suelo (*upper zone*).

Cuando la evapotranspiración es tomada, la evapotranspiración actual es equivalente a la evapotranspiración de referencia; sin embargo, cuando la evapotranspiración es tomada de la zona de tensión del suelo (*tension zone*), la evapotranspiración actual es un porcentaje de la evapotranspiración de referencia; tal como se muestra en la ecuación 57.

$$AET = ET \cdot f(CTs, Ts) \quad (57)$$

Donde:

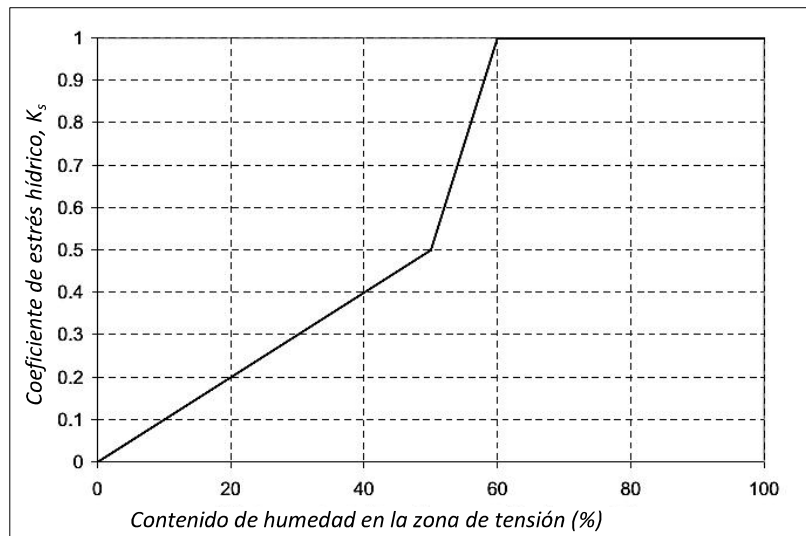
$AET$  : Evapotranspiración actual (mm).

$ET$  : Evapotranspiración de referencia (mm).

$CTs$  : Almacenamiento actual en la zona de tensión del suelo (mm).

$Ts$  : Almacenamiento máximo en la zona de tensión del suelo (mm).

Según la ecuación 57, la evapotranspiración actual de la zona de tensión resulta del producto de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de estrés hídrico; este último, está relacionado con el contenido de agua en la zona de tensión del suelo, expresado en porcentaje, tal como se muestra en la Figura 31. Cuando el contenido de agua en la zona de tensión supera el 60% de su capacidad, el coeficiente de estrés hídrico alcanza su valor máximo.



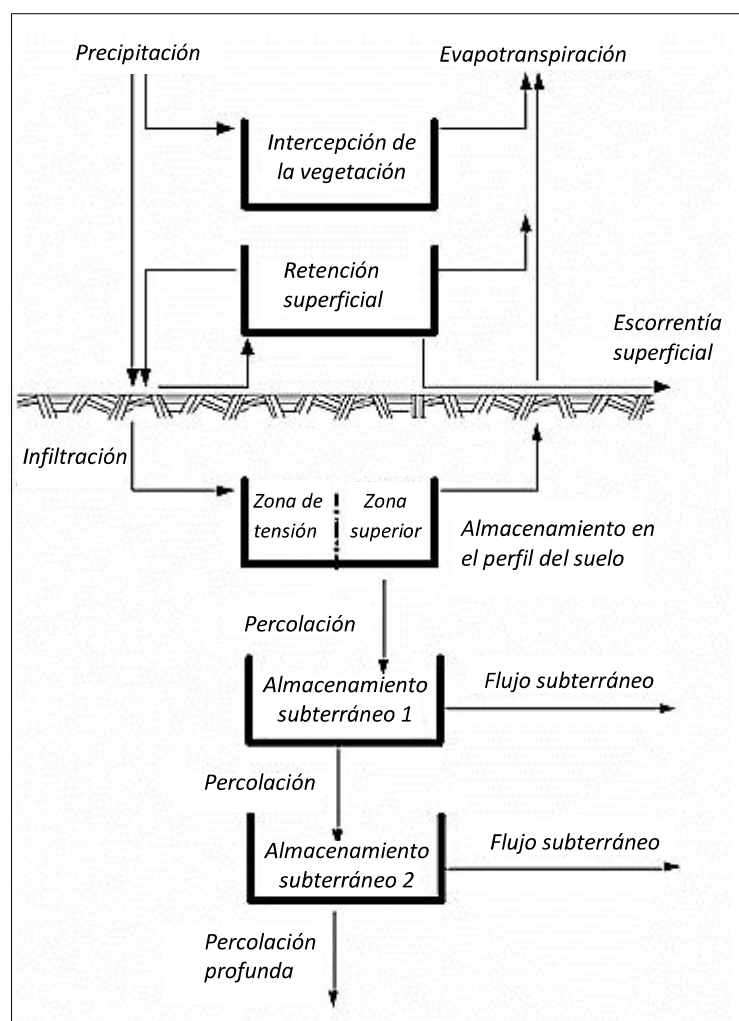
**Figura 31: Relación entre el coeficiente de estrés hídrico y el contenido de humedad del suelo, modelo Soil Moisture Accounting**  
 FUENTE: McEnroe, 2010

### Modelo de pérdidas

- **Consideración continua de la humedad del suelo (Soil moisture accounting)**

Se consideró de forma continua la humedad del suelo, teniendo en cuenta cuatro niveles distintos en los que la precipitación puede ser retenida o almacenada: (a) intercepción en la cobertura vegetal, *canopy interception*; (b) retenciones superficiales, *surface depression*; (c) perfil del suelo, *tension zone storage* y *upper zone storage*; y (d) acuífero (superficial), *groundwater layer 1 storage*. Cabe mencionar que un quinto nivel, correspondiente a un acuífero más profundo (*groundwater layer 2 storage*), es también propuesto por el modelo continuo; sin embargo, éste no se consideró para el caso de las cuencas Anya y Mchique.

La Figura 32 ilustra el esquema del modelo de consideración continua de la humedad del suelo, así como los niveles de almacenamiento.



**Figura 32: Esquema conceptual del módulo de HEC-HMS Soil Moisture Accounting**  
 FUENTE: US Army Corps of Engineers, 2010

A continuación, se describe cada uno de los almacenamientos considerados por el modelo de consideración continua de la humedad del suelo.

- ***Interceptación en la cubierta vegetal (Canopy storage)***

Representa la parte de la precipitación que no alcanza el suelo, porque es retenida por las plantas. La única entrada considerada es la precipitación, y la única salida es la evapotranspiración. Es en este nivel en dónde se almacenan las primeras precipitaciones, hasta alcanzar la máxima capacidad.

Dicho parámetro se estimó, para las cuencas Anya y Mchique, a partir de la inspección de campo realizada durante el periodo de diciembre 2011 – junio 2013; teniendo en

cuenta el porcentaje de cobertura vegetal, y considerando las intercepciones como el 10 % de la precipitación diaria.

- ***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 la precipitación que no fue interceptada por la vegetación, mientras que las salidas son la infiltración y la evapotranspiración. Posteriormente, el volumen que superó el máximo almacenamiento en este nivel pasa a ser escorrentía superficial.

Dicho parámetro se estimó, para las cuencas Anya y Mchique, a partir de la inspección de campo realizada durante el periodo diciembre 2011- junio 2013.

- ***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 la Eto).

En otras palabras, 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 (tension zone) es la diferencia entre el contenido de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez.

**Tabla 11: Sub-zonas de almacenamiento del perfil del suelo, modelo Soil Moisture Accounting**

<b>Zona superior (<i>Upper zone</i>)</b>	<b>Zona de tensión (<i>Tension zone</i>)</b>
Es la parte del suelo que puede perder agua por evapotranspiración o por percolación.  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.	Es la parte del agua contenida en el suelo que se pierde solamente por evapotranspiración.  Corresponde al agua adherida a las partículas del suelo; las raíces pueden utilizarla, pero no pueden moverla. La evapotranspiración toma primero agua de la <i>Upper zone</i> , y posteriormente de la <i>Tension zone</i> .

FUENTE: US Army Corps of Engineers, 2000

El almacenamiento en el perfil del suelo y en la zona de tensión, parámetros de modelo, se estimaron en base a la información de textura de suelos de los distritos de Sincos, Quilcas y Saño; obtenida del estudio “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).

Por otro lado, el almacenamiento del perfil del suelo tiene como entrada la infiltración desde la superficie, y como salidas, la evapotranspiración y la percolación hacia el acuífero subyacente.

### ***Infiltración***

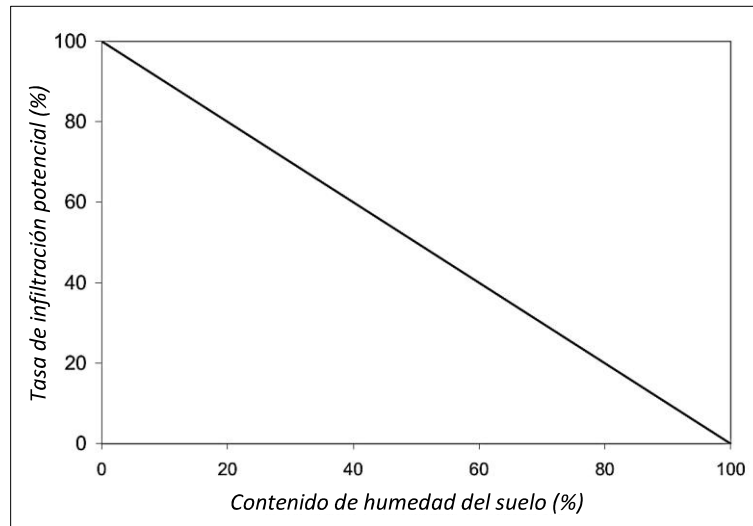
La tasa de infiltración potencial (PI), se calcula en el modelo Soil Moisture Accounting mediante la ecuación 58.

$$PI = If - \frac{CSs}{Ss} \cdot If \quad (58)$$

Donde:

- If* : Tasa de infiltración máxima del suelo (mm/hr).
- CSs* : Almacenamiento actual del suelo (mm).
- Ss* : Almacenamiento máximo del suelo (mm).

La velocidad máxima a la cual el agua puede ser absorbida en el suelo, en un instante “t”, se denomina la tasa de infiltración potencial, la cual varía con el contenido de agua del suelo. El modelo de consideración continua de la humedad del suelo supone que la tasa de infiltración potencial disminuye linealmente con el aumento de contenido de agua como se muestra en la Figura 33.



**Figura 33: Relación entre la tasa de infiltración potencial y el contenido de humedad del suelo, modelo Soil Moisture Accounting**

FUENTE: McEnroe, 2010

### ***Percolación***

La tasa de percolación desde el perfil del suelo hasta el acuífero adyacente,  $CSp$  (mm/hr), se calcula mediante la ecuación 59.

$$CSp = Sp \left( \frac{CSs}{Ss} \right) \left( 1 - \frac{CGs}{Gs} \right) \quad (59)$$

Donde:

$Sp$  : Tasa de percolación máxima del suelo (mm/hr).

$CSs$  : Almacenamiento actual del suelo (mm).

$Ss$  : Almacenamiento máximo del suelo (mm).

$CGs$  : Almacenamiento subterráneo actual (mm).

$Gs$  : Almacenamiento máximo subterráneo (mm).

Similarmente, se determina la tasa de percolación desde el acuífero hasta la salida,  $CGp$  (mm/hr); se calcula mediante la ecuación 60.

$$CGp = Gp \left( \frac{CGs}{Gs} \right) \left( 1 - \frac{CGs}{Gs} \right) \quad (60)$$

Donde:

$Gp$  : Tasa de percolación máxima del acuífero (mm/hr).

$CGs$  : Almacenamiento subterráneo actual (mm).

$Gs$  : Almacenamiento subterráneo máximo (mm).

- ***Almacenamiento en el acuífero (Groundwater storage)***

Se considera el almacenamiento en sólo uno de los dos acuíferos que propone el modelo de consideración continua de la humedad del suelo. Este almacenamiento subterráneo recibe directamente la percolación del agua gravífica que no es atrapada por la evapotranspiración, y que excedió la capacidad de almacenamiento del suelo. Desde este acuífero, el agua puede 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 una pérdida, ya que sale del sistema).

$$GW_{t+1} = \frac{CSp + Gs_t - RGp - 0.5GW_t.T}{RGs_t + 0.5T} \quad (60)$$

Donde:

$GW_t$  : Tasa de flujo subterráneo al inicio del intervalo de tiempo  $t$  (mm/hr).

$CSp$  : Percolación actual del suelo en el intervalo de tiempo  $t$  (mm/hr).

$Gs_t$  : Almacenamiento subterráneo máximo, en el intervalo de tiempo  $t$  (mm).

$RGp$  : Percolación potencial desde el acuífero hasta la salida, en el intervalo de tiempo  $t$  (mm/hr).

$RGs$  : Coeficiente subterráneo (hr).

$T$  : Intervalo de tiempo de la simulación (hr).

Posteriormente, el volumen de flujo subterráneo del río principal de la cuenca,  $GW$ , es calculado según la ecuación 61.

$$GW = 0.5(GW_{t+1} + GW_t) \cdot T \quad (61)$$

Donde:

$GW_t$  : Tasa de flujo subterráneo al inicio del intervalo de tiempo  $t$  (mm/hr).

$GW_{t+1}$  : Tasa de flujo subterráneo al inicio del intervalo de tiempo  $t+1$  (mm/hr).

$T$  : Intervalo de tiempo de la simulación (hr).

Este volumen es incorporado al flujo base del modelo, en caso de considerarse como un reservorio lineal.

### Transformación precipitación - escorrentía

- **Hidrograma sintético de Clark**

Supone que la cuenca funciona como un depósito; un aumento del caudal de entrada 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*), esto significa que existe una relación lineal entre el volumen almacenado en el depósito y el caudal de salida; se expresa mediante la ecuación 62.

$$S = Q * R \quad (62)$$

Donde:

$S$  : Volumen almacenado.

$Q$  : Caudal de salida de la cuenca.

$R$  : Constante de proporcionalidad.

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

$$V_{in} - V_{out} = \Delta S \quad (63)$$

Donde:

$V_{in}$  : 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:

$$I - Q = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (64)$$

Donde:

$I$  : 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  $\Delta t$ ; si el  $\Delta S$  a lo largo del  $\Delta t$  es:  $S_i - S_{i-1}$ , y sustituyendo estos valores en la ecuación 64, resulta:

$$\frac{I_{i-1} + I_i}{2} - \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} = \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t} \quad (65)$$

- Asimismo, introduciendo el valor  $S$  expresado en la ecuación 65, resulta:

$$\frac{I_{i-1} + I_i}{2} - \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} = R \cdot \frac{Q_i - Q_{i-1}}{\Delta t} \quad (66)$$

- Finalmente, despejando la ecuación 66, resulta:

$$Q_i = \frac{I_{i-1} + I_i}{2} \cdot c - Q_{i-1} \cdot (1 - c) \quad (67)$$

- Siendo:

$$c = \frac{2 \cdot \Delta t}{2R + \Delta t} \quad (68)$$

Donde:

$I_{i-1}, I_i$  : 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 en que tardaría una gota de agua en recorrer la longitud desde el punto más distante de la corriente de agua de una cuenca hasta el lugar de medición. Los tiempos de concentración fueron calculados a partir de las características geomorfológicas de las cuencas Anya y Mchique, mediante la ecuación 69 propuesta por Bransby Williams (López, 2004).

$$T_c = 0.243 \frac{L}{A^{0.1} S^{0.2}} \quad (69)$$

Donde:

- $L$  : Longitud del cauce principal de la cuenca (km).
- $A$  : Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).
- $S$  : Pendiente del cauce principal de la cuenca.

- ***Coefficiente de almacenamiento***

Es un índice que representa el almacenamiento 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 hr.

El coeficiente de almacenamiento de las cuencas Anya y Mchique se asumió como el 75% del tiempo de concentración.

**Tránsito de caudales simulados**

• ***Onda cinemática***

El método permite aproximar los canales naturales a formas básicas de sección transversal conocida, tomando en cuenta factores como: pendiente, longitud, dimensión transversal, forma y coeficiente de Manning. Las ecuaciones de continuidad y momento para el flujo del canal se expresan mediante las ecuaciones 70 y 71. La solución de las ecuaciones de onda cinemática especifica la distribución del flujo como una función de la distancia  $x$  a lo largo del canal y del tiempo  $t$ ; permitiendo conocer un  $Q(x,t)$ , en cada uno de los puntos de

la malla  $x - t$ , dados unos parámetros de canal  $\alpha_c$  y  $m_c$  (Pedraza, 2007). Finalmente, dicha solución permitirá determinar el hidrograma de salida.

$$q = \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} \quad (70)$$

$$Q = \alpha_c + A^{m_c} \quad (71)$$

Donde:

$Q$  : Caudal del canal ( $m^3/s$ ).

$A$  : Área transversal del canal ( $m^2$ ).

$q$  : Caudal lateral, por unidad del canal ( $m^3/s/m$ ).

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

A partir del trabajo de campo y de las mediciones realizadas, los ríos Anya y Mchique se consideraron como canales de sección rectangular; estimándose los parámetros  $\alpha_c$  y  $m_c$  según las ecuaciones 72 y 73.

$$\alpha_c = \frac{1.49 \cdot S_o^{1/2}}{n \cdot B^{2/3}} \quad (72)$$

$$m_c = \frac{5}{3} \quad (73)$$

Donde:

$n$  : Coeficiente de rugosidad de Manning.

$B$  : Base de la sección del canal (m).

$S_o$  : Pendiente del canal (m/m).

### **Flujo base**

- ***Reservorio lineal***

La consideración del flujo base como un reservorio lineal es usualmente usado con el modelo de consideración continua de la humedad del suelo descrito anteriormente. Describe el almacenamiento y movimiento del agua en el subsuelo como el

almacenamiento y movimiento del flujo a través de reservorios. Los reservorios son lineales: el flujo de salida de cada intervalo de simulación es una función lineal del promedio del almacenamiento durante cada intervalo de tiempo simulado. El flujo de salida del acuífero del modelo de consideración continua de la humedad del suelo fue el elemento de entrada hacia un reservorio lineal, que conformó el parte del flujo base del modelo.

Esta metodología sólo se utilizó en subcuencas ubicadas en la parte alta de las cuencas Anya y Mchique.

- ***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 o no variar de mes a mes.

Teniendo en cuenta las visitas de campo realizadas durante el periodo diciembre 2011 – junio 2013, así como el registro de los caudales medios diarios en épocas de estiaje, se consideró un flujo base constante para las subcuencas ubicadas en la parte baja de las cuencas Anya y Mchique.

### **Calibración y validación del modelo**

Se realizó de forma “manual”; es decir, mediante ensayos “prueba y error”, hasta encontrar valores óptimos para de ciertos estadísticos de bondad de ajuste (Eficiencia de Nash Sutcliffe y el Coeficiente de correlación de Pearson), los cuales reducen la incertidumbre entre los valores simulados y observados. La calibración consideró los caudales medios diarios del periodo enero 2012 – diciembre 2012; mientras que para la validación se usó la información hidrométrica del periodo enero 2013 – junio 2013. Los parámetros a calibrar se muestran en la Tabla 12.

**Tabla 12: Parámetros a ser calibrados, submodelo de pérdidas de Hec-HMS**

Parámetro	Unid.	Descripción
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 es 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 máximo	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 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

- **Eficiencia de Nash Sutcliffe**

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología. Se expresa mediante la ecuación 74.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (74)$$

Donde:

$Q_{sim,i}$  : Caudal simulado para el día  $i$  ( $m^3/s$ ).

$Q_i$  : Caudal observado para el día  $i$  ( $m^3/s$ ).

$\bar{Q}_i$  : Media de los caudales observados ( $m^3/s$ ).

Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta,  $E=1$ ; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces  $E=0$ .

- ***Coefficiente de correlación de Pearson (r)***

Expresa la dependencia lineal entre dos variables que, en nuestro caso, son los caudales observados y los caudales simulados. Se expresa mediante la ecuación 75.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})^2}} \quad (75)$$

Donde:

- $Q_{sim,i}$  : Caudal simulado para el día i (m<sup>3</sup>/s).
- $Q_i$  : Caudal observado para el día i (m<sup>3</sup>/s).
- $\bar{Q}_i$  : Media de los caudales observados (m<sup>3</sup>/s).
- $\bar{Q}_{sim,i}$  : Media de los caudales simulados (m<sup>3</sup>/s).

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.

- ***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 76.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)}{n} \quad (76)$$

Donde:

- $Q_{sim,i}$  : Caudal simulado para el día i (m<sup>3</sup>/s).
- $Q_i$  : Caudal observado para el día i (m<sup>3</sup>/s).
- $n$  : Número de días del periodo.

- ***Raíz del error cuadrático medio (RMSE)***

Permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Se expresa mediante la ecuación 77.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{n}} \quad (77)$$

Donde:

- $Q_{sim,i}$  : Caudal simulado para el día  $i$  ( $m^3/s$ ).
- $Q_i$  : Caudal observado para el día  $i$  ( $m^3/s$ ).
- $n$  : Número de días del periodo.

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.

- **Error de balance de masas ( $m$ )**

Expresa cuantitativamente la relación (porcentaje) entre el volumen del hidrograma observado y el simulado. Se expresa mediante la ecuación 78.

$$m = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (78)$$

Donde:

- $Q_{sim,i}$  : Caudal simulado para el día  $i$  ( $m^3/s$ ).
- $Q_i$  : Caudal observado para el día  $i$  ( $m^3/s$ ).
- $n$  : Número de días del periodo.

Si el ajuste es perfecto,  $m=0$ . En el proceso de calibración, se debe buscar alcanzar el valor más bajo de  $m$ .

En base a lo anterior, y teniendo en cuenta la simulación de caudales a nivel diario, los modelos Hec-HMS de las cuencas Anya y Mchique se consideraron adecuados si durante el proceso de calibración y validación se obtuvo un valor mínimo de Nash Sutcliffe de 0.50 y un coeficiente de correlación de Pearson de 0.70. Adicionalmente, se cuantificó el error en la simulación a fin de obtener un valor referencial.

### **Análisis de sensibilidad**

Los 9 parámetros finales obtenidos en la calibración del modelo se consideraron como línea base. El modelo se corrió repetitivamente con los valores de la línea base, para un parámetro multiplicado por 0.8 y 1.2, mientras los demás permanecían constantes. Luego, el hidrograma de salida fue comparado con el hidrograma observado del 2012. La *performance* del modelo se evaluó de acuerdo a la eficiencia de Nash Sutcliffe. Cabe mencionar que las condiciones iniciales de los almacenamientos no variaron.

#### ***b. Escenarios futuros***

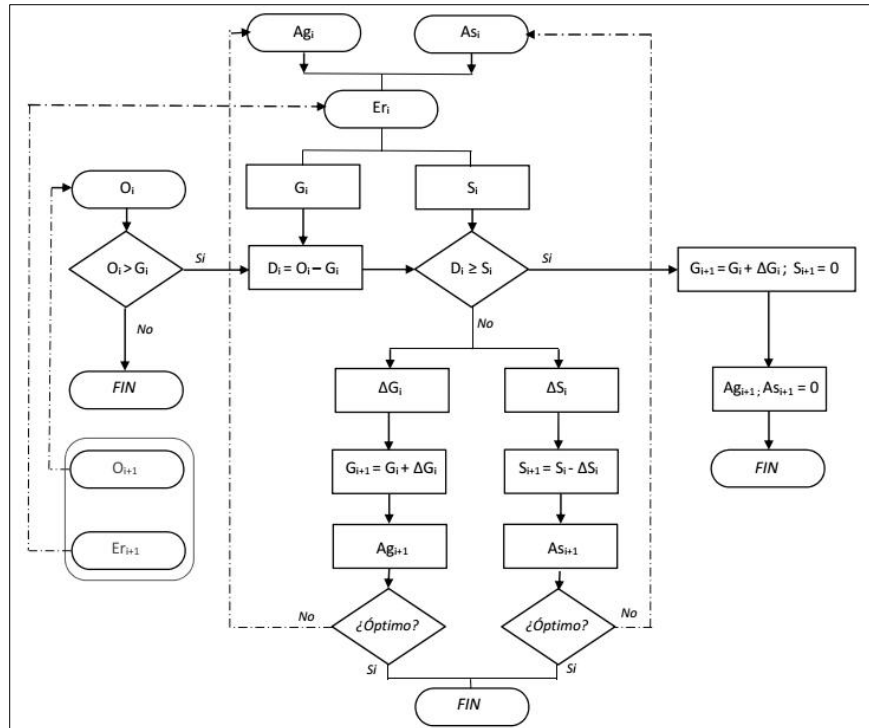
##### **Incorporación de áreas bajo secano**

Se planteó, principalmente, el incremento de las superficies regadas, teniendo en cuenta la transición de las actuales áreas en secano a un sistema de riego por gravedad. En base a ello, a fin de clarificar dicho proceso, se elaboró un algoritmo de incorporación de áreas en secano a un sistema de riego, mostrado en la Figura 34.

Dicho algoritmo plantea que, para un periodo inicial  $i$ , las áreas bajo riego  $Ag_i$  y áreas en secano  $As_i$  (cuyas demandas hídricas asociadas resultan  $G_i$  y  $S_i$  respectivamente; considerando una eficiencia de riego  $Er_i$ ) pueden ser satisfechas teniendo en consideración el incremento de áreas regadas. Para ello, la oferta hídrica  $O_i$  es contrastada con la demanda hídrica de áreas regadas  $G_i$ , a fin de determinar si existe suficiente disponibilidad hídrica  $D_i$  para cubrir el riego de las áreas en secano  $As_i$ . En base a lo anterior, el algoritmo considera la satisfacción total o parcial de  $S_i$ , sujeto al valor de  $D_i$ . De no ser  $S_i$  satisfecho por completo, las variaciones  $\Delta G_i$  y  $\Delta S_i$  producirán nuevas demandas  $G_{i+1}$  y  $S_{i+1}$  en un periodo  $i+1$ , cuyas nuevas áreas asociadas  $Ag_{i+1}$  y  $As_{i+1}$  producirán como resultado, la disminución de las superficies cultivadas en secano para ser incorporadas a un sistema de riego; o en su defecto, un nuevo contraste será evaluado basándose en estas áreas y, de ser necesario, en nuevos valores de  $O_{i+1}$  y/o  $Er_i$ .

Cabe mencionar, que la demanda hídrica de las áreas en secano ( $S_n$ ) se calcula con la misma metodología usada para las áreas bajo riego por gravedad, ya que el objetivo del presente análisis es conocer el volumen de agua requerido por estas nuevas áreas a ser regadas.





**Figura 34: Algoritmo de incorporación de áreas en seco al riesgo**  
FUENTE: Elaboración propia

Donde:

$Ag_i, Ag_{i+1}$  : Áreas bajo riego por gravedad en los periodos de tiempo  $i$  e  $i+1$ .

$As_i, As_{i+1}$  : Áreas en seco para los periodos de tiempo  $i$  e  $i+1$ .

$Er_i, Er_{i+1}$  : Eficiencia de riego en los periodos de tiempo  $i$  e  $i+1$ .

$O_i, O_{i+1}$  : Oferta hídrica en los periodos de tiempo  $i$  e  $i+1$ .

$G_i, G_{i+1}$  : Demanda hídrica (áreas bajo riego por gravedad) en los periodos de tiempo  $i$  e  $i+1$ .

$S_i, S_{i+1}$  : Demanda hídrica (áreas en seco) en los periodos de tiempo  $i$  e  $i+1$ .

$D_i, D_{i+1}$  : Disponibilidad hídrica para la incorporación de las áreas en seco, en los periodos de tiempo  $i$  e  $i+1$ .

### Escenarios futuros de balance hídrico

Se consideró el estudio de escenarios futuros de balance hídrico a corto, mediano y largo plazo, para las cuencas Anya y Mchique; teniendo tuvieron como referencia el “Estudio de vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la Cuenca del Río Mantaro” (IGP, 2005).

En base a lo anterior, las variables de los escenarios futuros se determinaron como variaciones porcentuales respecto al año base (2012), teniendo en cuenta los pronósticos para el 2050. Asimismo, se estimaron los caudales medios diarios para cada escenario, a partir de los modelos hidrológicos Hec-HMS elaborados para las cuencas Anya y Mchique. El escenario I se desarrolló a corto plazo (2017), el escenario II a mediano plazo (2022), mientras que los escenarios III y IV se desarrollaron, bajo diferentes condiciones, a largo plazo (2050). Finalmente, cada escenario fue modelado a través MODSIM; considerando el esquema hidráulico de ambas cuencas, así como la asignación de prioridades a cada una de las demandas, y el incremento de la eficiencia de riego de 30 a 45%. A continuación, se describen los escenarios futuros considerados.

- **Escenario I**

El escenario I se desarrolló, a nivel diario, para el 2017 (enero – diciembre). Considera la incorporación de las actuales áreas bajo secano a un régimen de riego por gravedad, teniendo en cuenta una eficiencia de riego del 30%. Las demandas poblacionales, pecuarias y ecológicas tuvieron ligera variación en relación al 2012. El detalle de las variables consideradas se presenta en el Cuadro 9.

**Cuadro 9: Variables consideradas en el Escenario I de las cuencas Anya y Mchique**

Variable	Anya	Mchique
Periodo	2017	2017
$\Delta$ Precipitación diaria	-2.50%	-2.50%
$\Delta$ Área cultivada	+3.95%	+3.95%
$\Delta$ Demanda poblacional	+6.58%	+6.58%
$\Delta$ Demanda pecuaria	+3.95%	+3.95%
Eficiencia de riego	30%	30%
<i>*Nivel de referencia: Balance hídrico en situación actual, 2012</i>		

FUENTE: Elaboración propia

- **Escenario II**

El escenario II se desarrolló, a nivel diario, para el 2022 (enero – diciembre). Considera la incorporación de las actuales áreas bajo secano a un régimen de riego por gravedad, teniendo en cuenta una eficiencia de riego del 45%. Las demandas poblacionales, pecuarias

y ecológicas tuvieron ligera variación en relación al 2012. El detalle de las variables consideradas se presentada en el Cuadro 10.

**Cuadro 10: Variables consideradas en el Escenario II de las cuencas Anya y Mchique**

<b>Variable</b>	<b>Anya</b>	<b>Mchique</b>
Periodo	2022	2022
$\Delta$ Precipitación diaria	-5.00%	-5.00%
$\Delta$ Área cultivada	+7.89%	+7.89%
$\Delta$ Demanda poblacional	+13.16%	+13.16%
$\Delta$ Demanda pecuaria	+7.89%	+7.89%
Eficiencia de riego	45%	45%
<i>*Nivel de referencia: Balance hídrico en situación actual, 2012</i>		

FUENTE: Elaboración propia

- **Escenario III**

El escenario III se desarrolló, a nivel diario, para el 2050 (enero – diciembre). Considera la incorporación de las áreas bajo secano a un régimen de riego por gravedad, teniendo en cuenta una eficiencia de riego del 30%; además de una disminución de la precipitación del 19%. Las demandas poblacionales se incrementaron en un 50%; las demandas pecuarias y las áreas cultivadas en un 30%; finalmente, la demanda ecológica disminuyó debido al descenso de los caudales en los ríos Anya y Mchique. El detalle de las variables consideradas se presentada el Cuadro 11.

**Cuadro 11: Variables consideradas en el Escenario III de las cuencas Anya y Mchique**

<b>Variable</b>	<b>Anya</b>	<b>Mchique</b>
Periodo	2050	2050
$\Delta$ Precipitación diaria	-19%	-19%
$\Delta$ Área cultivada	+30%	+30%
$\Delta$ Demanda poblacional	+50%	+50%
$\Delta$ Demanda pecuaria	+30%	+30%
Eficiencia de riego	30%	30%
<i>*Nivel de referencia: Balance hídrico en situación actual, 2012</i>		

FUENTE: Elaboración propia

- **Escenario IV**

El escenario IV se desarrolló, a nivel diario, para el 2050 (enero – diciembre). Considera la incorporación de las áreas bajo secano a un régimen de riego por gravedad, teniendo en cuenta una eficiencia de riego del 45%; además de una disminución de la precipitación del 19%. Las demandas poblacionales se incrementaron en un 50%; las demandas pecuarias y las áreas cultivadas en un 30%; finalmente, la demanda ecológica disminuyó debido al descenso de los caudales en los ríos Anya y Mchique. El detalle de las variables consideradas se presentada el Cuadro 12.

**Cuadro 12: Variables consideradas en el Escenario IV de las cuencas Anya y Mchique**

<b>Variable</b>	<b>Anya</b>	<b>Mchique</b>
Periodo	2050	2050
$\Delta$ Precipitación diaria	-19%	-19%
$\Delta$ Área cultivada	+30%	+30%
$\Delta$ Demanda poblacional	+50%	+50%
$\Delta$ Demanda pecuaria	+30%	+30%
Eficiencia de riego	45%	45%
<i>*Nivel de referencia: Balance hídrico en situación actual, 2012</i>		

FUENTE: Elaboración propia

### 3.2.4. Descripción de la percepción sobre la problemática de los recursos hídricos

#### a. Encuestas a la población

Se realizó encuestas con finalidad de conocer las principales necesidades y el grado de satisfacción de la población de las cuencas Anya y Mchique, en relación a los recursos hídricos. Hoy en día, muchos proyectos de riego resultan factibles económicamente; sin embargo, no toman en cuenta el interés y la participación de la población frente a dicha “necesidad”. Conflictos por el agua, obras paralizadas, falta de participación de la población, desorganización de usuarios de riego, etc; son reflejo de la falta de consideración de la opinión de la población dentro de proyectos y estudios técnicos. Actualmente, medidas gubernamentales como la consulta previa, son una valiosa fuente de información que debería de tomarse en cuenta al momento de elaborar estudios y proyectos.

Para esta etapa, se tuvo como metodología de trabajo la encuesta a la población de las cuencas Anya y Mchique, considerando muestras de 75 y 50 personas, respectivamente. La hoja de la encuesta elaborada se muestra en el Anexo 10, la cual se enfoca en 04 ejes de análisis: (a) visibilidad de la problemática del agua, (b) agua y medio ambiente, (c) cultura del agua y (d) hábitos de consumo.

A continuación, se detallan los objetivos de cada uno de los ejes de análisis:

- *Visibilidad de la problemática del agua*; conocer la problemática del agua en las cuencas en estudio y el grado de conciencia de la población frente cada problema suscitado.
- *Agua y medio ambiente*; tener una visión general acerca de la percepción de la población respecto al cambio climático y los problemas ambientales relacionados a las fuentes de agua.
- *Cultura del agua*; conocer el grado de relación recurso hídrico – población en cada una de las cuencas en estudio.
- *Hábitos de consumo*; conocer los diversos usos de los recursos hídricos y los hábitos de consumo de la población de las cuencas en estudio.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y discusión se presentan teniendo en cuenta la siguiente secuencia: resultados de la descripción del comportamiento de la precipitación total diaria y caudales medios diarios, de la determinación del balance hídrico, de la simulación del comportamiento hidrológico de las cuencas y, finalmente, los resultados correspondientes a la descripción de la percepción sobre la problemática de los recursos hídricos en las cuencas Anya y Mchique.

### 4.1. DE LA DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN TOTAL DIARIA Y CAUDALES MEDIOS DIARIOS

#### 4.1.1. Del análisis cartográfico y exploratorio de la información

##### *a. De la geomorfología de las cuencas en estudio*

El resumen de los parámetros geomorfológicos obtenidos para las cuencas Anya y Mchique se muestra en la Cuadro 13. Del análisis geomorfológico se puede notar las siguientes tendencias fisiográficas:

- 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 pendiente media de las cuencas Anya y Mchique es de 28.65 y 21.54%, respectivamente.
- La altura media ponderada de las cuencas Anya y Mchique es de 3589 y 3827 msnm, respectivamente; asimismo, la altura máxima y mínima de la cuenca Anya es de 4330 y 3218 msnm para la cuenca Anya, y de 4248 y 3271 msnm para la cuenca Mchique.
- El coeficiente de masividad de las cuencas Anya y Mchique es de 0.61 y 0.76, respectivamente.
- Las curvas hipsométricas de las cuencas Anya y Mchique se presentan en la Figura 35 y Figura 38 del Anexo 1.1, respectivamente; a partir de ellas se determinó la altura de

frecuencia media de ambas cuencas, las cuales son de 3651 y 3844 msnm, respectivamente.

- Los rectángulos equivalentes de las cuencas Anya y Mchique se presentan en la Figura 36 y la Figura 39 del Anexo 1.1, respectivamente; el lado mayor y menor de es de 19.17 y 2.47 km (cuenca Anya), y de 26.21 y 1.08 km (cuenca Mchique).
- Los polígonos de frecuencia de alturas de las cuencas Anya y Mchique se presentan en la Figura 37 y la Figura 40 del Anexo 1.1, respectivamente; a partir de ellas se determinó la altura más frecuente de ambas cuencas, las cuales son de 3264 y 3800 msnm, respectivamente.
- El coeficiente de compacidad de las cuencas Anya y Mchique es de 1.77 y 2.89, respectivamente, mientras que el factor de forma es de 0.22 y 0.14.
- La relación de elongación de las cuencas Anya y Mchique resulta de 0.83 y 0.64, respectivamente, mientras que la relación de circularidad es de 0.32 y 0.12.
- La longitud del cauce principal de las cuencas Anya y Mchique es de 14.66 y 14.22 km, respectivamente, mientras que la pendiente equivalente del cauce principal de 1.07 y 2.12%.
- El orden de la red hídrica de las cuencas Anya y Mchique resulta de 4 y 3, respectivamente; mientras que la frecuencia de corriente es de 5.63 y 1.61.
- La densidad de drenaje de las cuencas Anya y Mchique es de 2.20 y 1.63 km/km, respectivamente, mientras que la extensión media del escurrimiento es de 0.11 y 0.15 km.
- El coeficiente de torrencialidad de las cuencas Anya y Mchique resulta de 20.62 y 36.10 mm.año/km<sup>2</sup>, respectivamente, mientras que la relación de bifurcación es de 1.97 y 2.45.
- El tiempo de concentración de las cuencas Anya y Mchique es de 6.00 y 5.35 horas, respectivamente.

**Cuadro 13: Parámetros geomorfológicos de las cuencas Anya y Mchique**

Parámetros		Cuenca			
		Unidad	Anya	Mchique	
de Relieve	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	19.17	26.21
Coeficiente de masividad		m/km <sup>2</sup>	0.61	0.76	
de Forma	Coeficiente de compacidad	-	1.77	2.89	
	Factor de forma	-	0.22	0.14	
	Relación de elongación	-	0.83	0.64	
	Relación de circularidad	-	0.32	0.12	
de Drenaje	Longitud del cauce principal	km <sup>2</sup>	14.66	14.22	
	Pendiente equivalente constante del cauce principal	%	1.07	2.12	
	Orden de cuenca	-	4.00	3.00	
	Frecuencia de corriente	-	5.63	1.61	
	Densidad de drenaje	km/km	2.20	1.63	
	Extensión media del escurrimiento	km	0.11	0.15	
	Coeficiente de torrencialidad	mm/km <sup>2</sup>	20.62	36.10	
	Relación de bifurcación	-	1.97	2.45	
	Tiempo de concentración	hr	6.00	5.35	

FUENTE: Elaboración propia

***b. Del análisis exploratorio de la información***

**• Información Pluviométrica**

Las series temporales de las estaciones *Tambo*, *Colpar*, *Quilcas*, *Cruzpampa*, *Chacrampa*, *Sincos*, *Quero*, *Yanamuclo* y *Molinos*, se presentan en las Figuras 41 – 49 del Anexo 1.1.

- El análisis exploratorio de datos realizado a las series de precipitación diaria *Tambo*, *Colpar*, *Quilcas*, *Cruzpampa*, *Chacrampa* y *Sincos* (diciembre 2011 – junio 2013), mediante las gráficas de distribución de frecuencias presentes en las Figuras 50 - 55 del Anexo 1.1, muestra 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).



- El análisis exploratorio de la data de las estaciones pluviométricas *Tambo*, *Colpar*, *Quilcas*, *Cruzpampa*, *Chacrampa* y *Sincos*, mediante los diagramas de cajas presentes en las Figuras 59 – 64 del Anexo 1.1, muestra la dispersión de la precipitación total diaria a lo largo de los 19 meses estudiados. Se aprecia mayor dispersión de la precipitación diaria de setiembre a abril (especialmente de diciembre a marzo). Adicionalmente, las estaciones *Cruzpampa*, *Chacrampa* y *Sincos*, ubicadas en la margen derecha del río Mantaro, muestran menor dispersión de datos en comparación a las estaciones *Tambo*, *Colpar* y *Quilcas*, ubicadas en la margen izquierda del mismo río.
- El análisis exploratorio de la data de las estaciones *Tambo*, *Colpar*, *Quilcas*, *Cruzpampa*, *Chacrampa* y *Sincos*, mediante sus respectivas estadísticas descriptivas presentadas en el Cuadro 14, muestra una ligera variación entre las medias de cada serie analizada; siendo la estación *Sincos*, la de media más baja (2.11 mm). La varianza muestral de las series presenta valores máximos de 64.61 y 33.33 (*Tambo* y *Cruzpampa*, respectivamente), y mínimos de 19.91 y 16.91 (*Quilcas* y *Sincos*, respectivamente); indicativo de mayor dispersión de la precipitación diaria en las estaciones ubicadas en la margen izquierda del río Mantaro, en comparación a las ubicadas en la margen derecha. El valor de la mediana es mayor en la estación *Tambo* (1.00 mm), debido a la mayor dispersión de los valores de precipitación diaria a lo largo del periodo de estudio; en contraste, las estaciones restantes presentan valores muy bajos, cercanos a cero.

**Cuadro 14: Estadísticas descriptivas de las series de precipitación diaria (diciembre 2011 – junio 2013)**

	<b>Tambo</b>	<b>Colpar</b>	<b>Quilcas</b>	<b>Cruzpampa</b>	<b>Chacrampa</b>	<b>Sincos</b>
<b>N° Datos</b>	578.00	578.00	578.00	578.00	578.00	578.00
<b>Media</b>	3.94	3.01	2.64	3.03	2.67	2.11
<b>Desv. Stand.</b>	6.45	5.10	4.46	5.77	5.11	4.11
<b>Varianza</b>	41.61	26.05	19.91	33.33	26.08	16.91
<b>Mediana</b>	1.00	0.40	0.40	0.20	0.20	0.20
<b>Moda</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

FUENTE: Elaboración propia

- El análisis exploratorio de la data de las estaciones complementarias *Quero*, *Yanamuclo* y *Molinos* (enero 2012 - diciembre 2012), mediante las gráficas de distribución de frecuencias presentes en las Figuras 65 - 67 del Anexo 1.1, muestra una clara asimetría en las distribuciones, debido a la escala diaria de trabajo, la cual tomó en cuenta la predominancia de días con valor de precipitación nula (0.00 mm).
- El análisis exploratorio de los datos de las series *Quero*, *Yanamuclo* y *Molinos*, mediante los diagramas de cajas presentes en las Figuras 65 – 67 del Anexo 1.1, muestra la dispersión de la precipitación total diaria para cada mes del periodo de estudio. Asimismo, se aprecia mayor dispersión de los valores de precipitación diaria, de setiembre a abril, especialmente de diciembre a marzo.
- El análisis exploratorio de las series *Quero*, *Yanamuclo* y *Molinos*, mediante sus respectivas estadísticas descriptivas presentes en el Cuadro 15, muestra mayor valor de la media en la estación *Quero* (3.16 mm), y ligeras diferencias entre las estaciones *Yanamuclo* y *Molinos*. La varianza muestral de la estación *Quero* (28.05) es mucho mayor que las estaciones *Yanamuclo* y *Molinos*. Asimismo, el valor de la mediana y moda de las series no presenta diferencias significativas durante el 2012.

**Cuadro 15: Estadísticas descriptivas de las series de precipitación diaria, estaciones complementarias (enero 2012 - diciembre 2012)**

	<b>Quero</b>	<b>Yanamuclo</b>	<b>Molinos</b>
<b>Nº Datos</b>	366	366	366
<b>Media</b>	3.16	2.26	2.01
<b>Desv. Stand.</b>	5.30	3.99	3.69
<b>Varianza</b>	28.05	15.92	13.62
<b>Mediana</b>	0.40	0.20	0.20
<b>Moda</b>	0.00	0.00	0.00

FUENTE: Elaboración propia

- ***Información Hidrométrica***

- El análisis exploratorio de las series de caudales medios diarios de las estaciones hidrométricas *Anya* y *Mchique* (diciembre 2011 – junio 2013), mediante los diagramas de cajas presentes en las Figuras 70 y 71 del Anexo 1.1, muestra valores mucho más

dispersos de octubre a abril, debido a las crecidas ocurridas en dicho periodo. Adicionalmente, se nota mayor dispersión de los caudales medios diarios en el periodo diciembre 2011 – abril 2012, respecto al periodo diciembre 2012 – abril 2013.

- El análisis exploratorio de las series *Anya* y *Mchique*, mediante el análisis de valores atípicos presentes en las Figuras 72 y 73 del Anexo 1.1, muestra como posibles valores atípicos a los caudales diarios comprendidos en los meses de crecidas (diciembre 2011 – abril 2012), que superaron las cercas externas superiores; sin embargo, estos son aceptados como válidos ya que corresponden a caudales diarios pico, registrados directamente a través de las lecturas de las reglas limnimétricas.
- El análisis exploratorio de las series *Anya* y *Mchique*, mediante sus respectivas estadísticas descriptivas presentes en el Cuadro 16, muestra notables variaciones entre los valores de las medias de *Anya* y *Mchique* (0.57 y 0.16 m<sup>3</sup>/s, respectivamente), debido al tamaño de cada una de las cuencas, en relación a su área drenada. La varianza muestral de la estación *Anya* es mucho mayor que la estación *Mchique*; indicando una mayor variación de los caudales medios diarios del río *Anya*, y poca dispersión de los caudales del río *Mchique*. El valor de la mediana resulta mayor en la estación *Anya*, en comparación a la estación *Mchique*. Finalmente, el valor de la moda de la estación *Anya* se encuentra más alejada de su mediana, en comparación a la estación *Mchique*.

**Cuadro 16: Estadísticas descriptivas de las series de caudales diarios (diciembre 2013 – junio 2013)**

	<b>Anya</b>	<b>Mchique</b>
<b>N° Datos</b>	576.00	578.00
<b>Media</b>	0.57	0.16
<b>Desv. Stand.</b>	0.45	0.15
<b>Varianza</b>	0.20	0.02
<b>Mediana</b>	0.40	0.13
<b>Moda</b>	0.25	0.08

FUENTE: Elaboración propia

- **Evapotranspiración de referencia**

- El análisis exploratorio de las series de evapotranspiración de referencia diaria obtenidas a partir de la información climática de las estaciones *Quilcas* y *Cruzpampa* (diciembre 2011 – junio 2013), mediante las gráficas distribución de frecuencias presentes las Figuras 76 y 77 del Anexo 1.1, muestra distribuciones con una marcada concentración de datos alrededor de sus valores centrales; encontrándose también, una distribución ligeramente positiva de los datos analizados.
- El análisis exploratorio de las series de evapotranspiración de referencia diaria, mediante el análisis de sus respectivas estadísticas descriptivas presentes en el Cuadro 17, muestra una ligera variación entre los valores de las medias de las series *Quilcas* y *Cruzpampa* (2.63 y 2.92 mm, respectivamente), no encontrándose una variación espacial significativa.

**Cuadro 17: Estadísticas descriptivas de las series de evapotranspiración de referencia diaria (diciembre 2011 – junio 2013)**

	<b>Quilcas</b>	<b>Cruzpampa</b>
<b>N° Datos</b>	578.00	578.00
<b>Media</b>	2.63	2.92
<b>Desv. Stand.</b>	0.88	0.89
<b>Varianza</b>	0.78	0.80
<b>Mediana</b>	2.57	2.94
<b>Moda</b>	2.00	2.12

FUENTE: Elaboración propia

#### 4.1.2. De la hidrometeorología

##### a. Pluviometría

Las estaciones pluviométricas utilizadas en la presente investigación se muestran en la Foto 1 del Anexo 5; cuya descarga directa de la data permitió el presente análisis.

- **Persistencia de la precipitación total diaria**

- Las curvas de persistencia de la precipitación total diaria de las cuencas Anya y Mchique, para la época seca y la época de lluvias, se presentan en las Figuras 78 – 81 del Anexo 1.2. Para la época seca (mayo – agosto), la precipitación diaria al 75 y 95%

de persistencia es de 0.00 mm/día para ambas cuencas. Para la época de lluvias (setiembre – abril), la precipitación diaria al 75% de persistencia resulta 0.28 mm para la cuenca Anya, y 0.06 mm para la cuenca Mchique; mientras que para el 95% de persistencia, resulta 0.00 mm para ambas cuencas.

- **Variación espacial de la media y varianza de la precipitación diaria del 2012**
- La variación espacial de la media y varianza se presenta en las Figuras 82 y 83 del Anexo 1.2. Se puede apreciar que la distribución espacial de la varianza de cada estación está directamente relacionada a la variación altitudinal de las mismas; siendo las estaciones ubicadas a mayor altitud (*Tambo* y *Cruzpampa*), las de mayor varianza (>30), mientras que valores entre 10 - 20 corresponden a las estaciones ubicadas a menos de 3400 msnm. Las estaciones con mayor valor de media son *Tambo* y *Quero* (>3mm). En base a lo anterior, en referencia a las estaciones ubicadas a similar altitud (*Cruzpampa – Quero*, *Chacrampa – Colpar*), se puede señalar que las estaciones ubicadas en la margen derecha del río Mantaro presentan mayor varianza que las de la margen izquierda; indicativo de mayor variabilidad en relación a días secos y húmedos. El Cuadro 18 muestra el resumen los valores de media y varianza para las precipitaciones del 2012.

**Cuadro 18: Variación espacial de la media y varianza de la precipitación diaria del 2012**

Estación	Altitud (msnm)	Pp. anual (mm)	Media (mm)	Varianza
Tambo	4097	1354.01	3.70	38.38
Cruzpampa (*)	3894	1063.55	2.91	31.94
Quero	3882	1158.00	3.16	28.05
Chacrampa (*)	3619	989.40	2.70	27.47
Colpar	3509	1011.40	2.76	23.98
Molinos	3427	737.30	2.01	13.62
Quilcas	3355	880.26	2.41	19.03
Yanamuclo	3330	827.75	2.26	15.92
Sincos (*)	3328	766.80	2.10	17.10

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

FUENTE: Elaboración propia

- **Componentes principales de la precipitación diaria del 2012**

- Se realizó a partir de la elaboración de una matriz de correlaciones (r), la cual se muestra en el Cuadro 19 y, gráficamente, en la Figura 84 del Anexo 1.2. Las pruebas de Esfericidad de Bartlett y KMO (Cuadro 20) arrojan resultados que dan visto bueno al uso de dicha técnica multivariada.

**Cuadro 19: Matriz de correlaciones (r) de la precipitación total diaria del 2012**

Estación	Tambo	Quilcas	Colpar	Cruzpampa	Chacrampa	Sincos	Quero	Yanamuclo	Molinos
Tambo	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Quilcas	0.79	1	-	-	-	-	-	-	-
Colpar	0.87	0.93	1	-	-	-	-	-	-
Cruzpampa	0.53	0.57	0.61	1	-	-	-	-	-
Chacrampa	0.52	0.58	0.60	0.89	1	-	-	-	-
Sincos	0.55	0.60	0.61	0.78	0.82	1	-	-	-
Quero	0.59	0.49	0.52	0.49	0.45	0.50	1	-	-
Yanamuclo	0.48	0.51	0.53	0.73	0.73	0.78	0.50	1	-
Molinos	0.59	0.55	0.56	0.61	0.59	0.62	0.74	0.59	1

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 20: Test de esfericidad de Bartlett y KMO**

Prueba		Valor
Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		0.80
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aprox.	2553
	gl.	21
	Sig.	0.00

FUENTE: Elaboración propia

- En base al análisis anterior, los componentes principales y el gráfico de sedimentación respectivo (Figura 85), muestran el porcentaje de varianza explicada por cada componente (vectores propios), tal como se aprecia en el Cuadro 21. El número de componentes a utilizarse se eligió de acuerdo al porcentaje de varianza que explicaban; concentrándose el 67, 79 y 88%, en los tres primeras componentes (PC1, PC2 y PC3), respectivamente. Con respecto a la matriz de componentes principales (Cuadro 22) y sus respectivos pesos o factores de ponderación para cada variable (estaciones), se observa que la PC1 (67%) muestra pesos similares para todas las estaciones; demostrando que para un 67% de varianza explicada, la zona de estudio

resulta homogénea, en relación a la precipitación diaria del 2012. La PC2 (12%) presenta alta correlación negativa para las estaciones *Cruzpampa*, *Chacrampa*, *Sincos* y *Yanamuclo*; y la PC3 (9%) muestra pesos mayores a 0.5 para las estaciones *Quero* y *Molinos*.

**Cuadro 21: Valores y vectores propios de la matriz de correlaciones**

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
<b>Varianza</b>	6.00	1.10	0.79	0.31	0.25	0.19	0.19	0.11	0.04
<b>Prop. de varianza</b>	0.67	0.12	0.09	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00
<b>Prop. acumulada</b>	0.67	0.79	0.88	0.91	0.94	0.96	0.98	1.00	1.00

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 22: Matriz de componentes principales de la precipitación diaria del 2012**

Estación	PC1	PC2	PC3
<b>Tambo</b>	0.329	0.450	-0.066
<b>Quilcas</b>	0.336	0.395	-0.287
<b>Colpar</b>	0.348	0.402	-0.278
<b>Cruzpampa</b>	0.347	-0.331	-0.140
<b>Chacrampa</b>	0.347	-0.353	-0.202
<b>Sincos</b>	0.350	-0.309	-0.106
<b>Quero</b>	0.289	0.144	0.696
<b>Yanamuclo</b>	0.326	-0.360	-0.006
<b>Molinos</b>	0.324	0.003	0.529

FUENTE: Elaboración propia

- A fin de facilitar la interpretación de la estructura de la información, los PC1, PC2 y PC3 se rotaron mediante el método *Varimax*, las puntuaciones de los componentes rotados (RC1 y RC2) se muestran en la Figura 88 del Anexo 1.2; el Cuadro 23 muestra los vectores propios de cada uno. Los componentes rotados (RC1, RC2 y RC3) presentan una proporción de varianza explicada de 37, 67 y 88%, respectivamente. Los pesos de cada variable (estaciones) respecto a cada componente rotado se muestran en el Cuadro 24, observándose que la RC1 (37%) muestra mayor peso para las estaciones *Chacrampa*, *Cruzpampa*, *Sincos* y *Yanamuclo*, mientras que para las estaciones restantes, la correlación resulta inferior a 0.42. La RC2 (30%) muestra alta correlación para las estaciones *Tambo*, *Quilcas* y *Colpar*, y la RC3 (20%) muestra mayor peso para las estaciones *Quero* y *Molinos*.

**Cuadro 23: Valores y vectores propios (rotación *varimax*)**

	<b>RC1</b>	<b>RC2</b>	<b>RC3</b>
<b>Varianza</b>	3.33	2.74	1.83
<b>Prop. de varianza</b>	0.37	0.30	0.20
<b>Prop. acumulada</b>	0.37	0.67	0.88

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 24: Matriz de componentes rotados de la precipitación diaria del 2012**

<b>Estación</b>	<b>RC1</b>	<b>RC2</b>	<b>RC3</b>
<b>Tambo</b>	0.232	0.831	0.364
<b>Quilcas</b>	0.331	0.876	0.190
<b>Colpar</b>	0.344	0.897	0.212
<b>Cruzpampa</b>	0.848	0.300	0.225
<b>Chacrampa</b>	0.877	0.304	0.173
<b>Sincos</b>	0.829	0.309	0.259
<b>Quero</b>	0.222	0.279	0.882
<b>Yanamuelo</b>	0.805	0.202	0.305
<b>Molinos</b>	0.419	0.283	0.771

FUENTE: Elaboración propia

- Con respecto a los componentes *sin rotar*, el PC1 se puede denominar como la precipitación diaria del 2012, ocurridas en una zona homogénea, ya que explica el 67% de la varianza común y se muestran pesos similares en todas las estaciones. La PC2 describe la variabilidad espacial y temporal de la precipitación diaria del 2012, entre la margen izquierda y derecha del río Mantaro. El PC3 no puede ser definido, debido a que el número de estaciones con alto peso es insuficiente. Con respecto a los componentes *rotados*, se determina para el 2012, que la precipitación diaria de la margen derecha del río Mantaro (37%) presenta, ligeramente, mayor variabilidad temporal que la margen izquierda (30%).
- La gráfica de puntuaciones para el PC1 y PC2 (Figuras 86 y 87) resume la matriz de correlaciones, la cual muestra una clara concentración de valores de precipitación diaria, propios de días secos; y la presencia de altos valores de precipitación correspondientes a días de los meses de fuertes lluvias (diciembre – marzo). Por otro lado, la gráfica de puntuaciones para los componentes rotados RC1 y RC2 (Figura 88), muestra la dispersión de valores de precipitación diaria de la margen derecha e



izquierda del río Mantaro, para el 2012; apreciándose la misma concentración de la precipitación, y valores pico correspondientes a días de fuertes lluvias. Finalmente, el análisis de componentes principales para las series de precipitación diaria del 2012 demuestra que la densidad de estaciones utilizadas en el presente estudio resulta suficiente para describir la variabilidad espacial de la precipitación en las cuencas Anya y Mchique; así como, el uso de los polígonos de Thiessen para determinar la precipitación media areal de las cuencas en estudio.

- ***Distribución acumulada de la precipitación diaria del año 2012***

- Las gráficas de distribución acumulada de todas las estaciones analizadas se presentan en las Figuras 89 – 97 del Anexo 1.2; muestran que los días sin precipitación (0.00 mm) tienen una frecuencia acumulada que varía de 70 a 75% para las estaciones *Cruzpampa*, *Chacrampa*, *Sincos* y *Yanamuclo* (ubicadas en la margen derecha del río Mantaro); de 65 a 70% para las estaciones *Tambo*, *Colpar* y *Quilcas* y *Molinos* (ubicadas en la margen izquierda); y de 60 a 65% para la estación *Quero*. El 95% de la frecuencia acumulada de la precipitación diaria del 2012 es de 10 a 12.5 mm, para las estaciones *Tambo*, *Quero*, *Cruzpampa*, *Chacrampa*, *Colpar* y *Quilcas*; y de 7.5 a 10 mm, para las estaciones *Sincos*, *Yanamuclo* y *Molinos*.

- b. Hidrometría***

Las estaciones hidrométricas *Anya* y *Mchique* se presentan en las Fotos 11 y 12 del Anexo 5; a partir de ellas, se determinaron los caudales medios diarios del periodo diciembre 2011 – junio 2013, cuyos valores permitieron la realización del presente análisis.

- ***Curva de calibración de caudales***

- La curva de calibración de caudales de la estación hidrométrica *Anya* se muestra en la Figura 98 del Anexo 1.2. La ecuación de calibración altura-caudal para dicha estación hidrométrica resultó:  $Q = 6.8544 \cdot (H - 0.0035)^{1.2844}$ . El coeficiente de correlación de Pearson (r) entre los caudales aforados y los caudales simulados por la curva de calibración es de 0.97; con una significancia estadística (p) de 0.00, para un intervalo de confianza del 95%.

- La curva de calibración de caudales de la estación hidrométrica *Mchique* se muestra en la Figura 99 del Anexo 1.2. La ecuación de calibración altura-caudal para dicha estación hidrométrica resultó:  $Q = 1.3923 \cdot (H - 0.0005)^{1.3402}$ . El coeficiente de correlación de Pearson (r) entre los caudales aforados y los caudales simulados por la curva de calibración es de 0.81; con una significancia estadística (p) de 0.00, para un intervalo de confianza del 95%.
- Las secciones típicas de los ríos Anya y Mchique se presentan en las Figuras 100 y 101 del Anexo 1.2, respectivamente. Ambas secciones transversales presentan modificaciones por socavación poco significativas a lo largo del año; sin embargo, la presencia de sedimentos y gravas modifican constantemente las secciones de los ríos, especialmente en épocas de crecidas.
- ***Persistencia de caudales medios diarios simulados***
  - Las curvas de persistencia de los caudales medios diarios los ríos Anya y Mchique, para la época de estiaje y crecidas, se presentan en las Figuras 102 – 105 del Anexo 1.2. Para la época de estiaje (mayo – octubre), el caudal medio diario al 75% de persistencia es 0.220 y 0.070 m<sup>3</sup>/s para la cuenca Anya y Mchique, respectivamente; mientras que para el 95% de persistencia es 0.150 y 0.005 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Para la época de crecidas (noviembre – abril), el caudal medio diario al 75% de persistencia resulta 0.580 m<sup>3</sup>/s para la cuenca Anya, y 0.130 m<sup>3</sup>/s para la cuenca Mchique; mientras que al 95% de persistencia resulta 0.390 y 0.070 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

## **4.2. DE LA DETERMINACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO**

### **4.2.1. Oferta hídrica**

- ***Oferta hídrica de la cuenca Anya***
  - Para el periodo diciembre 2011 – junio 201, la oferta hídrica está representada fundamentalmente por los volúmenes aportados por el río Anya, con un volumen medio diario de 70,970 m<sup>3</sup> en época de crecidas (noviembre – abril), y 27,030 m<sup>3</sup> en época de estiaje (mayo – octubre); en menor proporción, por los manantiales permanentes *Quilcas-1*, *Casacancha-1*, *Casacancha-2*, *Colpar-1*, *Llacta-1* y *Saño-1*, cuyos aportes medios diarios varían de 80 a 380 m<sup>3</sup>.

- **Oferta hídrica de la cuenca Mchique**

- Para el periodo diciembre 2011 – junio 2013, la oferta hídrica está representada fundamentalmente por los volúmenes aportado por el río Mchique, con un volumen medio diario de 21,390 m<sup>3</sup> en época de crecidas (noviembre – abril), y 8,400 m<sup>3</sup> en época de estiaje (mayo – octubre); en menor proporción, por los manantiales permanentes *Huaripata-1*, *Cruzpampa-1*, *Aramachay-1*, *Aramachay-2*, y *Chacrampa-1*, cuyos aportes medios diarios varían de 60 a 1,560 m<sup>3</sup>.

#### 4.2.2. Demanda hídrica

- **Consideraciones iniciales**

- El Cuadro 25 presenta la extensión de superficie cultivada, en secano y bajo riego, de ambas cuencas en estudio; el Cuadro 26 muestra dichos valores en función a su porcentaje. Por otro lado, el Cuadro 27 presenta la población total estimada para las cuencas Anya y Mchique.

**Cuadro 25: Área cultivada, en secano y bajo riego, en las cuencas Anya y Mchique**

Cuenca	Área cultivada (ha)		
	Secano	Gravedad	Total
Anya	1222.81	417.78	1640.59
Mchique	740.37	148.19	888.55

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 26: Porcentaje de área cultivada, en secano y bajo riego, en las cuencas Anya y Mchique**

Cuenca	Área cultivada (%)		
	Secano	Gravedad	Total
Anya	74.53%	25.47%	100%
Mchique	83.32%	16.68%	100%

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 27: Población asentada en las cuencas Anya y Mchique**

Cuenca	Población 2011	Población 2012	Población 2013
	Nº hab.	Nº hab.	Nº hab.
Anya	7947	7953	7956
Mchique	2843	2854	2863

FUENTE: Elaboración propia

- ***Demanda hídrica de la cuenca Anya***

- Para el periodo diciembre 2011 – junio 2013, la demanda hídrica está definida principalmente por su demanda agrícola y, en menor proporción, por los requerimientos hídricos poblaciones, pecuarios y ecológicos.
- La cuenca Anya posee un área bajo riego por gravedad de 417.78 ha, la cual representa el 25.47% del total de áreas cultivadas en la cuenca. En base a lo anterior, la cédula de cultivo se elaboró a partir de la información de cultivos, obtenida para los distritos de Quilcas y Saño, y el centro poblado de Casacancha; la cual se presenta en el Cuadro 28 y la Figura 106 del Anexo 2. 1. Se observa la predominancia del cultivo de papa y alfalfa; siendo mucho menores las áreas cultivadas con maíz, habas, olluco y avena grano.

**Cuadro 28: Cédula de cultivo, áreas bajo riego por gravedad en la cuenca Anya**

<b>Cultivo</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Fecha de siembra</b>	<b>Fecha de cosecha</b>
Papa	211.82	1 de noviembre	10 de mayo
Alfalfa	197.77	1 de enero	31 de diciembre
Maíz	7.63	1 de octubre	4 de mayo
Habas	0.35	1 de octubre	14 de abril
Olluco	0.13	1 de septiembre	18 de julio
Oca	0.06	1 de septiembre	4 de mayo
Avena grano	0.02	1 de noviembre	10 de mayo

FUENTE: Elaboración propia

- El proceso de cálculo de la demanda hídrica neta (evapotranspiración de referencia, evapotranspiración del cultivo y precipitación efectiva a nivel diaria) se presenta en la Figura 108 del Anexo 2. 1. Basado en dicho proceso, se observa que la serie de evapotranspiración del cultivo no muestra marcadas diferencias respecto a la serie de evapotranspiración de referencia; la serie de precipitación efectiva diaria, con valores pico de hasta 7 mm, amortigua de la demanda hídrica neta de la cuenca. Asimismo, la demanda hídrica neta obtenida a nivel diario, presenta mayor variación (amplitud) en los días correspondientes a la época de lluvias (setiembre – mayo).

- La demanda pecuaria y poblacional de la cuenca Anya, a nivel diaria, se considera constante para el periodo diciembre 2011 – junio 2013; con valores de 70 y 1,560 m<sup>3</sup>, respectivamente.
  - La demanda ecológica del río Anya, estimada a través de la metodología propuesta por la ANA, es 0.082 m<sup>3</sup>/s para la época de crecidas (noviembre – mayo), y 0.047 m<sup>3</sup>/s para la época de estiaje (setiembre – abril).
  - Finalmente, todas las demandas hídricas consideradas para el periodo diciembre 2011 – junio 2013, se presentan en la Figura 110 del Anexo 2.1.
- ***Demanda hídrica de la cuenca Mchique***
    - Para el periodo diciembre 2011 – junio 2013, la demanda hídrica está definida principalmente por su demanda agrícola y, en menor proporción, por los requerimientos hídricos poblaciones, pecuarios y ecológicos.
    - La cuenca Mchique posee un área bajo riego por gravedad de 148.19 ha, la cual representa el 16.68% del total de áreas cultivadas en la cuenca. En base a lo anterior, la cédula de cultivo se elaboró a partir de la información obtenida para el distrito de Sincos, y se presenta en el Cuadro 29 y la Figura 107 del Anexo 2. 1. Se observa la predominancia del cultivo de alfalfa; siendo mucho menor las áreas cultivadas con avena forrajera y avena grano.

**Cuadro 29: Cédula de cultivo, áreas bajo riego por gravedad en la cuenca del Mchique**

Cultivo	Área (ha)	Fecha de siembra	Fecha de cosecha
Alfalfa	84.69	1 de enero	31 de diciembre
Habas	21.17	1 de noviembre	15 de mayo
Papa	19.29	1 de octubre	9 de abril
Maíz	8.57	1 de diciembre	4 de julio
Arveja	6.19	1 de noviembre	15 de mayo
Cebada Grano	2.94	1 de diciembre	9 de junio
Alcachofa	2.67	1 de enero	31 de diciembre
Avena forrajera	2.33	1 de diciembre	9 de junio
Avena Grano	0.33	1 de diciembre	9 de junio

FUENTE: Elaboración propia

- El proceso de cálculo de la demanda hídrica neta (evapotranspiración de referencia, evapotranspiración del cultivo y precipitación efectiva a nivel diaria) se presenta en la Figura 109 del Anexo 2.1. Basado en dicho proceso, se observa que la serie de evapotranspiración del cultivo no muestra marcadas diferencias en comparación a la serie de evapotranspiración de referencia; la serie de precipitación efectiva diaria, con valores pico de hasta 7 mm, amortigua de la demanda hídrica neta de la cuenca. Asimismo, la demanda hídrica neta obtenida a nivel diario, presenta mayor variación de valores (amplitud) en los días correspondientes a la época de lluvias (setiembre – mayo).
- Las demanda pecuaria y poblacional de la cuenca Mchique, a nivel diaria, se considerada constante para el periodo diciembre 2011 – junio 2013; con valores de 130 y 570 m<sup>3</sup>, respectivamente.
- La demanda ecológica del río Mchique, estimada a través de la metodología propuesta por la ANA, es 0.025 m<sup>3</sup>/s para la época de crecidas (noviembre – mayo), y 0.014 m<sup>3</sup>/s para la época de estiaje (setiembre – abril).
- Finalmente, todas las demandas hídricas consideradas para el periodo diciembre 2011 – junio 2013, se presentan en la Figura 111 del Anexo 2.1.

#### **4.2.3. Balance hídrico en situación actual**

- ***Balance de la cuenca Anya***

- El resultado del balance hídrico de la cuenca Anya se presenta la Figura 112 del Anexo 2.2, y el Cuadro 30. En base a ello, se encontró la predominancia de días con satisfacción de las demandas hídricas, debido a la ausencia de días con *déficit hídrico* significativo (sólo un 13.02%, comprendido entre el 04/07/12 y el 03/10/12; los cuales corresponden a días dentro del periodo de estiaje del río Anya); siendo el 86.98%, el porcentaje de días con *superávit hídrico*. El *superávit diario promedio* es del 62%, mientras que sólo un 14% corresponde al *déficit diario promedio*. Finalmente, el valor máximo de déficit hídrico (34%) se presentó el 30/08/12, y el máximo valor de superávit (97%) ocurrió el 16/12/11.

**Cuadro 30: Déficit y superávit hídrico, balance hídrico actual de la cuenca Anya (diciembre 2011 – junio 2013)**

	<b>Déficit (-)</b>	<b>Superávit (+)</b>
<b>N° días</b>	75	501
<b>Porcentaje</b>	13.02%	86.98%
<b>Máximo</b>	0.34	0.97
<b>Promedio</b>	0.14	0.62

FUENTE: Elaboración propia

- ***Balance de la cuenca Mchique***

- Los resultados del balance hídrico de la cuenca Mchique se presentan la Figura 113 del Anexo 2.2, y el Cuadro 31. En base a ello, se encontró la predominancia de días con satisfacción de las demandas hídricas, debido a la ausencia de días con *déficit hídrico* significativos (sólo un 2.94%); siendo el 97.06%, el porcentaje de días con *superávit hídrico*. El *superávit promedio diario* es del 62%, mientras que sólo un 17% corresponde al *déficit promedio diario*. Finalmente, el valor máximo de déficit hídrico (43%) se presentó el 02/01/12, y el máximo valor de superávit (98%) se presentó el 08/02/12 y el 09/02/12.

**Cuadro 31: Déficit y superávit hídrico, balance hídrico actual de la cuenca Mchique (diciembre 2011 – junio 2013)**

	<b>Déficit (-)</b>	<b>Superávit (+)</b>
<b>N° días</b>	17	561
<b>Porcentaje</b>	2.94%	97.06%
<b>Máximo</b>	0.43	0.98
<b>Promedio</b>	0.17	0.62

FUENTE: Elaboración propia

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

#### 4.3.1. Del modelo hidrológico

##### a. Modelo de la cuenca Anya

- Se obtuvo un coeficiente de Nash Sutcliffe (n) de 0.52 y 0.67 para la calibración y validación, respectivamente; mientras que los valores del coeficiente de correlación de Pearson (r) resultaron 0.73 y 0.86, respectivamente. En base a ello, se califica al modelo como *bueno*, más aún, tratándose de un modelo a escala diaria. Por otro lado,

se cuantificó el error del modelo, mostrando valores aceptables del error medio (MBE) de 0.02 y 0.05 para la calibración y validación, respectivamente; valores de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 0.14 y 0.23 para la calibración y validación, respectivamente; y valores del error volumétrico (%V) de 3.49 y 8.27% para la calibración y validación, respectivamente. El Cuadro 32 muestra el resumen de valores para cada estadístico de bondad de ajuste, mientras que las Figuras 114 -116 del Anexo 3.1 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 Anya.

**Cuadro 32: Estadísticos de bondad de ajuste, modelo hidrológico de la cuenca Anya**

<b>Estadístico</b>	<b>Calibración (ene12 – dic12)</b>	<b>Validación (ene13 – jun13)</b>
<b>Nash Sutcliffe</b>	0.52	0.67
<b>r</b>	0.73	0.86
<b>MBE</b>	0.02	0.05
<b>RMSE</b>	0.14	0.23
<b>%V</b>	3.49%	8.27%

FUENTE: Elaboración propia

- El resumen de los parámetros del modelo de pérdidas Soil Moisture Accounting se muestra en el Cuadro 33, los cuales se asumieron de acuerdo a las características de la cuenca, y luego se calibraron usando los caudales medios diarios del 2012. La tasa infiltración máxima, el almacenamiento máximo y la percolación máxima del suelo, tienen significante influencia en las descargas simuladas. Los valores de la intercepción en la cubierta vegetal, y en las depresiones superficiales, tomaron valores entre 0.5 y 1 mm. La tasa de infiltración máxima asumió valores entre 5 y 10 mm, de acuerdo con el suelo franco-arcilloso de la zona de estudio. El almacenamiento en el perfil del suelo y en la zona de tensión, tuvieron una relación aproximada de 1:1.8, en base a una porosidad del 43% y una profundidad de 2.5 m. La tasa máxima de percolación del suelo, la tasa de percolación subterránea máxima, el almacenamiento subterráneo máximo y el coeficiente subterráneo, asumieron valores a partir de la calibración del modelo y los caudales medios diarios observados.



**Cuadro 33: Parámetros calibrados del submodelo de pérdidas, modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Anya**

Parámetro	Unidad	Subcuenca		
		sub_1	sub_2	sub_3
Intercepción en la cubierta vegetal	mm	0.50	1.00	0.50
Intercepción en las depresiones superficiales	mm	0.50	1.00	0.50
Tasa de infiltración máxima	mm/hr	5.00	8.40	3.00
Almacenamiento total del suelo	mm	94	94	94
Almacenamiento en la zona de tensión	mm	50	50	50
Tasa de percolación máxima del suelo	mm/hr	0.70	0.70	0.70
Almacenamiento subterráneo máximo	mm	200	150	180
Tasa de percolación subterránea máxima	mm/hr	0.70	0.8	0.5
Coefficiente subterráneo	hr	600	500	550

FUENTE: Elaboración propia

- El análisis de la sensibilidad de los 9 parámetros mencionados anteriormente, se presenta en las Figuras 117 y 118 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 el almacenamiento en el perfil del suelo, resultan los parámetros más importantes dentro de la performance del modelo; los parámetros restantes sólo produjeron ligeras variaciones en los estadísticos analizados.

***b. Modelo de la cuenca Mchique***

- Se obtuvo un coeficiente de Nash Sutcliffe (n) de 0.61 y 0.55 para la calibración y validación, respectivamente; mientras que los valores del coeficiente de correlación de Pearson (r) resultan 0.78 y 0.76, respectivamente. En base a ello, se califica al modelo como *bueno*, más aún, tratándose de un modelo a *escala diaria*. Por otro lado, se cuantificó el error del modelo, mostrando valores aceptables del error medio (MBE) de 0.00 y 0.01 para la calibración y validación, respectivamente; valores de valores de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 0.10 y 0.06 para la calibración y validación, respectivamente; y valores del error volumétrico (%V) de 0.71% y 4.17% para la calibración y validación, respectivamente. El Cuadro 34 muestra el resumen de valores de cada estadístico de bondad de ajuste, mientras que las Figuras 119 – 121 del Anexo 3.1 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 Mchique.

**Cuadro 34: Estadísticos de bondad de ajuste, modelo hidrológico de la cuenca Mchique**

<b>Estadístico</b>	<b>Calibración (ene12 – dic12)</b>	<b>Validación (ene13 – jun13)</b>
<b>Nash Sutcliffe</b>	0.61	0.55
<b>r</b>	0.79	0.76
<b>MBE</b>	0.00	0.01
<b>RMSE</b>	0.10	0.06
<b>%V</b>	0.71%	4.17%

FUENTE: Elaboración propia

- El resumen de los parámetros del modelo de pérdidas Soil Moisture Accounting se muestra en el Cuadro 35, los cuales se asumieron de acuerdo a las características de la cuenca, y luego se calibraron usando los caudales medios diarios del 2012. La tasa infiltración máxima, el almacenamiento máximo y la percolación máxima del suelo, tienen significativa influencia en las descargas simuladas. Los valores de la intercepción en la cubierta vegetal, y en las depresiones superficiales, tomaron valores entre 0.5 y 1 mm. La tasa de infiltración máxima asumió valores entre 5 y 10 mm, de acuerdo con el suelo franco-arcilloso de la zona de estudio. El almacenamiento en el perfil del suelo y en la zona de tensión, tuvieron una relación aproximada de 1:1.8, en base a una porosidad del 43% y una profundidad de 2.5 m. La tasa máxima de percolación del suelo, la tasa de percolación subterránea máxima, el almacenamiento subterráneo máximo y el coeficiente subterráneo, asumieron valores a partir de la calibración del modelo y los caudales medios diarios observados.

**Cuadro 35: Parámetros calibrados del submodelo de pérdidas, modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Mchique**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Subcuenca</b>		
		<b>sub_1</b>	<b>sub_2</b>	<b>sub_3</b>
Intercepción en la cubierta vegetal	mm	1.00	0.50	0.50
Intercepción en las depresiones superficiales	mm	1.00	1.00	0.50
Tasa de infiltración máxima	mm/hr	5.00	6.50	6.00
Almacenamiento total del suelo	mm	80	80	80
Almacenamiento en la zona de tensión	mm	55	55	55
Tasa de percolación máxima del suelo	mm/hr	1.00	1.00	0.50
Almacenamiento subterráneo máximo	mm	200	250	150
Tasa de percolación subterránea máxima	mm/hr	1.00	1.25	0.50
Coficiente subterráneo	hr	600	700	600

FUENTE: Elaboración propia

- El análisis de la sensibilidad de los 9 parámetros mencionados anteriormente, se presenta en las Figuras 122 y 123 del Anexo 3.1, para la eficiencia de Nash Sutcliffe y el coeficiente de correlación de Pearson, respectivamente. Se muestra que el almacenamiento en el perfil del suelo, resulta el parámetro más importante dentro de la performance del modelo; los parámetros restantes sólo produjeron ligeras variaciones en los estadísticos analizados.

#### 4.3.2. De los escenarios futuros

##### a. Escenarios futuros de la cuenca Anya

- Comprendió el estudio de un escenario a corto, un a escenario mediano y dos escenarios a largo plazo; para el 2017, 2022 y 2050, respectivamente. Cada escenario consideró la demanda hídrica de nuevas áreas agrícolas, propias de la incorporación de áreas en secano a un régimen de riego, teniendo como referencia, la cédula de cultivo de las actuales áreas en secano (Cuadro 36). El esquema hidráulico de la cuenca se elaboró mediante el uso del modelo MODSIM, permitiendo distribuir la oferta según la prioridad asignada a cada demanda (ecológica=1, poblacional=5, pecuaria=5, bajo riego inicial=10, bajo riego incorporada=2000).

**Cuadro 36: Cédula de cultivo de las actuales áreas en secano en la cuenca Anya**

Cultivo	Área (ha)	Fecha de siembra	Fecha de cosecha
Maíz	759.24	1 de octubre	4 de mayo
Papa	242.14	1 de noviembre	10 de mayo
Avena grano	212.75	1 de noviembre	10 de mayo
Habas	6.26	1 de octubre	14 de abril
Oca	1.1	1 de septiembre	4 de mayo
Olluco	1	1 de septiembre	18 de julio
Arveja	0.26	1 de octubre	14 de abril
Alfalfa	0.06	1 de enero	31 de diciembre

FUENTE: Elaboración propia

##### • *Escenario I*

- Simulado al 2017, contempló el incremento de áreas bajo riego, considerando la actual eficiencia de riego del 30% (Figura 124 del Anexo 3.2). Las demandas poblacionales, pecuarias y ecológicas variaron ligeramente, en relación a la situación actual. El Cuadro 37 muestra los volúmenes diarios requeridos por las demandas pecuarias,

poblacionales y ecológicas para el presente escenario. El resultado del balance hídrico se presenta en el Cuadro 38 y la Figura 124 del Anexo 3.2; el cual muestra el incremento de días bajo déficit hídrico (46.58%), respecto a la situación actual, debido al requerimiento hídrico generado por las nuevas áreas bajo riego; sin embargo, los días de superávit hídrico son mayores (53.42%). El déficit promedio diario es del 42%, mientras que el superávit promedio diario es del 65%; los días de mayor déficit y superávit fueron el 04/01/17 y 25/02/17, respectivamente.

**Cuadro 37: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario I de la cuenca Anya**

Pecuaria	Poblacional	Ecológica	
		Crecidas	Estiaje
70 m <sup>3</sup>	1,700 m <sup>3</sup>	9,620 m <sup>3</sup>	3,950 m <sup>3</sup>

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 38: Déficit y superávit hídrico del Escenario I de la cuenca Anya (2017)**

	Déficit (-)	Superávit (+)
<b>Nº días</b>	170	195
<b>Porcentaje</b>	46.58%	53.42%
<b>Máximo</b>	0.86	0.96
<b>Promedio</b>	0.42	0.65

FUENTE: Elaboración propia

- **Escenario II**

- Simulado al 2022, contempló el incremento de las áreas bajo riego, considerando una eficiencia de riego del 45% (Figura 125 del Anexo 3.2). Las demandas poblacionales, pecuarias y ecológicas variaron ligeramente, en relación a la situación actual. El Cuadro 41 muestra los volúmenes diarios requeridos por las demandas pecuarias, poblacionales y ecológicas. El resultado del balance hídrico se presenta en el Cuadro 40 y la Figura 129 del Anexo 3.2, el cual muestra el incremento de días bajo déficit hídrico (39.18%), respecto a la situación actual, debido al requerimiento hídrico generado por las nuevas áreas bajo riego; sin embargo, los días de superávit hídrico son mayores (60.82%). El déficit promedio diario es del 31%, mientras que el superávit promedio diario es del 64%; los días de mayor déficit y superávit fueron el 04/01/12 y el 25/02/12, respectivamente.

**Cuadro 39: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario II de la cuenca Anya**

Pecuaria	Poblacional	Ecológica	
		Crecidas	Estiaje
80 m <sup>3</sup>	1,800 m <sup>3</sup>	67,500 m <sup>3</sup>	3,850 m <sup>3</sup>

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 40: Déficit y superávit hídrico del Escenario II de la cuenca Anya (2022)**

	Déficit (-)	Superávit (+)
Nº días	143	222
Porcentaje	39.18%	60.82%
Máximo	0.81	0.96
Promedio	0.31	0.64

FUENTE: Elaboración propia

- **Escenario III**

- Simulado al 2050, contempló incremento de las áreas regadas, considerando la actual eficiencia de riego del 30% y la disminución de la precipitación diaria en un 19% (Figura 126 del Anexo 3.2). Las demandas poblacionales, pecuarias y ecológicas variaron porcentualmente, en relación a la situación actual. El Cuadro 41 muestra los volúmenes diarios requeridos por las demandas pecuarias, poblacionales y ecológicas. El resultado del balance hídrico se presenta en el Cuadro 42 y la Figura 130 del Anexo 3.2, el cual muestra el incremento de días bajo déficit hídrico (53.70%), respecto a la situación actual, debido al requerimiento hídrico generado por las nuevas áreas bajo y a la disminución de la precipitación; sin embargo, los días de superávit hídrico fueron ligeramente mayores (46.30%). El déficit promedio diario es del 50%, mientras que el superávit promedio diario es del 68%; los días de mayor déficit y superávit fueron el 04/01/50 y el 25/02/50, respectivamente.

**Cuadro 41: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario III de la cuenca Anya**

Pecuaria	Poblacional	Ecológica	
		Crecidas	Estiaje
90 m <sup>3</sup>	2,390 m <sup>3</sup>	5,860 m <sup>3</sup>	3,690 m <sup>3</sup>

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 42: Déficit y superávit hídrico del Escenario III de la cuenca Anya (2050)**

	<b>Déficit (-)</b>	<b>Superávit (+)</b>
<b>N° días</b>	196	169
<b>Porcentaje</b>	53.70%	46.30%
<b>Máximo</b>	0.89	0.94
<b>Promedio</b>	0.50	0.68

FUENTE: Elaboración propia

- **Escenario IV**

- Simulado al 2050, contempló incremento de las áreas bajo riego, pero considerando una eficiencia de riego del 45% y la disminución de la precipitación diaria en un 19% (Figura 127 del Anexo 3.2). Las demandas poblacionales, pecuarias y ecológicas variaron porcentualmente, en relación a la situación actual. El Cuadro 43 muestra los volúmenes diarios requeridos por las demandas pecuarias, poblacionales y ecológicas. El resultado del balance hídrico se presenta en el Cuadro 44 y la Figura 130 del Anexo 3.2, el cual muestran el incremento de días bajo déficit hídrico (44.93%), respecto a la situación actual, debido al requerimiento hídrico generado por las nuevas áreas bajo riego y a la disminución de la precipitación; sin embargo, los días de superávit hídrico son ligeramente mayores (55.07%). El déficit promedio diario es del 39%, mientras que el superávit promedio diario es del 64%; los días de mayor déficit y superávit fueron el 04/01/50 y el 25/02/50, respectivamente.

**Cuadro 43: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario IV de la cuenca Anya**

<b>Pecuaria</b>	<b>Poblacional</b>	<b>Ecológica</b>	
		<b>Crecidas</b>	<b>Estiaje</b>
90 m <sup>3</sup>	2,390 m <sup>3</sup>	5,860 m <sup>3</sup>	3,690 m <sup>3</sup>

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 44: Déficit y superávit hídrico del Escenario IV de la cuenca Anya (2050)**

	<b>Déficit (-)</b>	<b>Superávit (+)</b>
<b>N° días</b>	164	201
<b>Porcentaje</b>	44.93%	55.07%
<b>Máximo</b>	0.84	0.94
<b>Promedio</b>	0.39	0.64

FUENTE: Elaboración propia

**b. Escenarios futuros de la cuenca Mchique**

- Comprendió el estudio de un escenario a corto, un a escenario mediano y dos escenarios a largo plazo; para el 2017, 2022 y 2050, respectivamente. Cada escenario consideró la demanda hídrica de nuevas áreas agrícolas, propias de la incorporación de áreas en secano a un régimen de riego; teniendo como referencia, la cédula de cultivo de las actuales áreas en secano (Cuadro 45). El esquema hidráulico de la cuenca se elaboró mediante el uso del modelo MODSIM, permitiendo distribuir de la oferta según la prioridad asignada a cada demanda (ecológica=1, poblacional=5, pecuaria=5, bajo riego inicial=10, bajo riego incorporada=2000).

**Cuadro 45: Cédula de cultivo de las actuales áreas en secano en la cuenca Mchique**

Cultivo	Área (ha)	Fecha de siembra	Fecha de cosecha
Papa	235.47	1 de octubre	9 de abril
Cebada Grano	194.87	1 de diciembre	9 de junio
Maíz	59.48	1 de diciembre	4 de julio
Avena forrajera	57.51	1 de diciembre	9 de junio
Avena Grano	45.89	1 de diciembre	9 de junio
Arveja	41.36	1 de noviembre	15 de mayo
Habas	37.66	1 de noviembre	15 de mayo
Quinua	30.57	1 de noviembre	4 de junio
Trigo	26.67	1 de diciembre	9 de junio
Olluco	5.99	1 de septiembre	18 de julio
Alfalfa	3.81	1 de enero	31 de diciembre
Oca	1.09	1 de septiembre	4 de mayo

FUENTE: Elaboración propia

- **Escenario I**

- Simulado al 2017, contempló el incremento de las áreas bajo riego, considerando la actual eficiencia de riego del 30% (Figura 132 del Anexo 3.2). Las demandas poblacionales, pecuarias y ecológicas variaron ligeramente, en relación a la situación actual. El Cuadro 46 muestra los volúmenes diarios requeridos por las demandas pecuarias, poblacionales y ecológicas. El resultado del balance hídrico se presenta en el Cuadro 47 y la Figura 136 del Anexo 3.2, el cual muestra el incremento de días de déficit hídrico (47.12%), respecto a la situación actual, debido al requerimiento hídrico generado por las nuevas áreas bajo riego; sin embargo, los días de superávit hídrico son mayores (52.88%). El déficit promedio diario es del 43%, mientras que el

superávit promedio diario es del 62%; los días de mayor déficit superávit fueron el 02/01/17 y 08/02/17, respectivamente.

**Cuadro 46: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario I de la cuenca Mchique**

Pecuaria	Poblacional	Ecológica	
		Crecidas	Estiaje
130 m <sup>3</sup>	610 m <sup>3</sup>	2,090 m <sup>3</sup>	1,190 m <sup>3</sup>

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 47: Déficit y superávit hídrico del Escenario I de la cuenca Mchique (2017)**

	Déficit (-)	Superávit (+)
<b>Nº días</b>	172	193
<b>Porcentaje</b>	47.12%	52.88%
<b>Máximo</b>	0.91	0.98
<b>Promedio</b>	0.43	0.62

FUENTE: Elaboración propia

- **Escenario II**

- Simulado al 2022, contempló el incremento de las áreas regadas, considerando una eficiencia de riego del 45% (Figura 133 del Anexo 3.2). Las demandas poblacionales, pecuarias y ecológicas variaron ligeramente, en relación a la situación actual. El Cuadro 48 muestra los volúmenes diarios requeridos por las demandas pecuarias, poblacionales y ecológicas. El resultado del balance hídrico se presenta en el Cuadro 49 y la Figura 137 del Anexo 3.2, el cual muestra el incremento de días de déficit hídrico (32.60%), respecto a la situación actual, debido al requerimiento hídrico generado por las nuevas áreas bajo riego; sin embargo, los días bajo superávit hídrico son mayores (67.40%). El déficit promedio diario es del 42%, mientras que el superávit promedio diario es del 57%; los días de mayor déficit y superávit fueron el 02/01/12 y el 08/02/12, respectivamente.

**Cuadro 48: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario II de la cuenca Mchique**

Pecuaria	Poblacional	Ecológica	
		Crecidas	Estiaje
140 m <sup>3</sup>	650 m <sup>3</sup>	2,030 m <sup>3</sup>	1,160 m <sup>3</sup>

FUENTE: Elaboración propia



**Cuadro 49: Déficit y superávit hídrico del Escenario II de cuenca Mchique (2022)**

	<b>Déficit (-)</b>	<b>Superávit (+)</b>
<b>N° días</b>	119	246
<b>Porcentaje</b>	32.60%	67.40%
<b>Máximo</b>	0.88	0.98
<b>Promedio</b>	0.42	0.57

FUENTE: Elaboración propia

- **Escenario III**

- Simulado al 2050, contempló el incremento de las áreas bajo, considerando la actual eficiencia de riego del 30% y la disminución de la precipitación diaria en un 19% (Figura 134 del Anexo 3.2). Las demandas poblacionales, pecuarias y ecológicas variaron porcentualmente, en relación a la situación actual. El Cuadro 50 muestra los volúmenes diarios requeridos por las demandas pecuarias, poblacionales y ecológicas. El resultado del balance hídrico se presenta en el Cuadro 51 y la Figura 138 del Anexo 3.2, el cual muestra el incremento de días bajo déficit hídrico (62.19%), respecto a la situación actual, debido al requerimiento hídrico generado por las nuevas áreas regadas y a la disminución de la precipitación; sin embargo, los días bajo superávit hídrico son menores (37.81%). El déficit promedio diario es del 51%, mientras que el superávit promedio diario es del 75%; los días de mayor déficit y superávit fueron el 02/01/50 y el 08/02/50, respectivamente.

**Cuadro 50: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario III de la cuenca Mchique**

<b>Pecuaria</b>	<b>Poblacional</b>	<b>Ecológica</b>	
		<b>Crecidas</b>	<b>Estiaje</b>
160 m <sup>3</sup>	860 m <sup>3</sup>	1,790 m <sup>3</sup>	990 m <sup>3</sup>

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 51: Déficit y superávit hídrico del Escenario III de cuenca Mchique (2050)**

	<b>Déficit (-)</b>	<b>Superávit (+)</b>
<b>N° días</b>	227	138
<b>Porcentaje</b>	62.19%	37.81%
<b>Máximo</b>	0.92	0.97
<b>Promedio</b>	0.51	0.75

FUENTE: Elaboración propia

- **Escenario IV**

- Simulado al 2050, contempló el incremento de las áreas bajo riego, pero considerando una eficiencia de riego del 45% y la disminución de la precipitación diaria en un 19% (Figura 135 del Anexo 3.2). Las demandas poblacionales, pecuarias y ecológicas variaron porcentualmente, en relación a la situación actual. El Cuadro 52 muestra los volúmenes diarios requeridos por las demandas pecuarias, poblacionales y ecológicas. El resultado del balance hídrico se presenta en el Cuadro 53 y la Figura 139 del Anexo 3.2, el cual muestra el incremento de días de déficit hídrico (48.49%), respecto a la situación actual, debido al requerimiento hídrico generado por las nuevas áreas bajo riego y a la disminución de la precipitación; sin embargo, los días bajo superávit hídrico son ligeramente mayores (51.51%). El déficit promedio diario es del 42%, mientras que el superávit promedio diario es del 61%; los días de mayor déficit y superávit fueron el 02/01/50 y el 08/02/50, respectivamente.

**Cuadro 52: Demanda pecuaria, poblacional y ecológica diaria del Escenario IV de la cuenca Mchique**

Pecuaria	Poblacional	Ecológica	
		Crecidas	Estiaje
160 m <sup>3</sup>	860 m <sup>3</sup>	1,790 m <sup>3</sup>	990 m <sup>3</sup>

FUENTE: Elaboración propia

**Cuadro 53: Déficit y superávit hídrico del Escenario IV de cuenca Mchique (2050)**

	Déficit (-)	Superávit (+)
<b>Nº días</b>	177	188
<b>Porcentaje</b>	48.49%	51.51%
<b>Máximo</b>	0.89	0.97
<b>Promedio</b>	0.42	0.61

FUENTE: Elaboración propia

**c. Comparativo de escenarios futuros**

- Los gráficos comparativos de satisfacción de las demandas hídricas, para los escenarios futuros de las cuencas Anya y Mchique, se presentan en las Figuras 140 y 141 del Anexo 3.2, respectivamente. Los escenarios II y IV muestran claramente, a través de la disminución del déficit de la demanda hídrica, el efecto positivo del que incremento de la actual eficiencia de riego, del 30% al 45%. El escenario III para

ambas cuencas, muestra mayor volumen de déficit hídrico, en comparación a los demás escenarios. Se observó que los escenarios I y IV de ambas cuencas se muestran ligeramente similares, lo cual demuestra que el incremento de la actual eficiencia de riego amortiguaría los efectos del cambio climático sobre la oferta hídrica de las cuencas Anya y Mchique al 2050.

***d. Área bajo riego incorporada***

- De acuerdo con el algoritmo de incorporación de las actuales áreas en secano al riego, la superficie bajo riego incrementada en las cuencas Anya y Mchique, para cada escenario futuro, se muestran en el Cuadro 54. El desarrollo del algoritmo no cumplió con la incorporación de todas las actuales áreas en secano; sin embargo, se obtuvieron, basados en la disponibilidad hídrica de cada escenario, nuevas superficies agrícolas a ser potencialmente regadas.
  
- La nueva superficie bajo riego, de cada escenario analizado, se presentan en las Figuras 142 y 143 del Anexo 3.2. En base a lo expuesto anteriormente, las áreas bajo riego incorporadas en la cuenca Anya correspondieron aproximadamente al doble de sus respectivas áreas iniciales, mientras que en la cuenca Mchique éstas resultaron alrededor del triple. En relación al escenario I y III ( $E_r = 30\%$ ), el área a ser incorporada decreció en ambas cuencas; sin embargo, para los escenarios II y IV ( $E_r = 45\%$ ), estas superficies se incrementaron en relación a los escenarios I y III.

**Cuadro 54: Área incorporada al riego en las cuencas Anya y Mchique**

Escenario	Año	Área incorporada (ha)	
		Anya	Mchique
I	2017	757.09	501.99
II	2022	940.39	639.93
III	2050	635.82	429.58
IV	2050	842.52	519.74

FUENTE: Elaboración propia

#### **4.4. DE LA DESCRIPCIÓN DE LA PERCEPCIÓN SOBRE LA PROBLEMÁTICA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

##### **4.4.1. Encuestas a la población**

Los resultados correspondientes a dichas encuestas, se presentan en las Figuras 144 – 162 del Anexo 4.1 (caso de la cuenca Anya), y las Figuras 162 – 180 del Anexo 4. 2 (caso de la cuenca Mchique).

- El eje correspondiente a la “Visibilidad de la problemática del agua” mostró que la población habitante de las cuencas Anya y Mchique tiene un alto grado de consciencia sobre problemática del agua, entendiendo aspectos como: la disminución de fuentes de agua, escasez del recurso hídrico, contaminación de fuentes hídricas, organización de usuarios de riego, mejoramiento de las técnicas de riego, conflictos sociales por el agua, etc. Adicionalmente, se mostraron insatisfechos con la actual forma de regar sus cultivos (secano principalmente); estando dispuestos a contar con sistemas de riego que les permita tener varias campañas al año. Finalmente, tienen en cuenta que la escasez de dotaciones de agua limita la producción agrícola de la zona.
  
- El eje correspondiente al “Agua y Medio Ambiente” mostró que para la percepción de los pobladores del Anya: (a) la calidad de las aguas del río Anya es “mala”; (b) el río Anya es la principal fuente de agua que se encuentra en “mal uso”; (c) los caudales del río Anya vienen disminuyendo en comparación a años anteriores; (d) las lluvias en la cuenca han venido disminuyendo a lo largo de los últimos años. De igual manera, para la percepción de los pobladores del Mchique: (a) la calidad de las aguas del río Mchique es “buena”; (b) son los puquiales las fuentes de agua en “mal uso”; (c) el caudal del río Mchique ha venido disminuyendo en la cuenca; sin embargo, (d) las lluvias en la zona se han incrementado en los últimos años. Finalmente, ambos coinciden en que las fuertes lluvias se presentan entre los meses diciembre-febrero.
  
- El eje correspondiente a la “Cultura del Agua” mostró que para los pobladores de la cuenca Anya: (a) los “ríos y acequias” representan una gran oportunidad de desarrollo, estando dispuestos a realizar actividades para su mejor aprovechamiento; (b) consideran que “mayores dotaciones de agua” son el principal factor para el incremento de áreas agrícolas. Análogamente, para los pobladores de la cuenca

Mchique: (a) los “ríos y acequias” representan una valiosa oportunidad de desarrollo; (b) sostienen que el principal factor para el incremento de nuevas áreas agrícolas es el “riego organizado”, a través de la organización de los usuarios de riego y la creación de comisiones de riego, sólidas y eficientes.

- El eje correspondiente a los “Hábitos de Consumo” mostró que para los pobladores de las cuencas Anya: (a) el uso “doméstico” del agua acoge al mayor número de usuarios; (b) el mayor número de agricultores cultivan sus tierras en seco; (c) el abastecimiento del agua potable es considerado “bueno”; (d) contando con sistema de riego tecnificado los usuarios agrícolas pueden “producir más”. De igual forma, para los pobladores de la cuenca Mchique: (a) el uso “doméstico” del agua alberga al mayor número de usuarios; (b) el mayor número de agricultores cultivan sus tierras en seco; (c) consideran “malo” el abastecimiento del agua potable en la zona; (d) señalan que con un sistema de riego tecnificado podrían “ahorrar más agua”.
  
- Adicionalmente, los pobladores de las cuencas Anya y Mchique sostienen que de incrementarse áreas agrícolas bajo riego, éstas podrían ser cultivadas “rentablemente” con papa, maíz y hortalizas. Asimismo, los pobladores se encuentran dispuestos a apoyar en la construcción y mantenimiento de infraestructura de riego, así como a la conformación de juntas de regantes; sin embargo, ello dependerá de la iniciativa de sus respectivas autoridades, ya que muchas veces ello no sucede.

## V. CONCLUSIONES

Las conclusiones de la presente investigación son producto del estudio y análisis de la información hidrometeorológica recolectada directamente a partir de la instalación de 04 estaciones pluviométricas automáticas, 05 estaciones meteorológicas automáticas y 02 estaciones hidrométricas. Asimismo, ello fue posible gracias a la ardua labor de campo realizada mensualmente en el departamento de Junín, distritos de Quilcas y Sincos. A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas en la presente tesis:

- 5.1. El régimen espacial y temporal de la precipitación total diaria de las cuencas Anya y Mchique es similar. Por otro lado, la precipitación diaria al 50% de persistencia en época seca (mayo – agosto) es 0.00 mm para ambas cuencas; mientras que en época de lluvias (setiembre - abril) es 1.82 mm para la cuenca Anya, y 1.15 mm para la cuenca Mchique. Con respecto a las descargas diarias de los ríos Anya y Mchique, el caudal medio diario al 50% de persistencia en época de estiaje (mayo - octubre) es 0.290 m<sup>3</sup>/s para la cuenca Anya, y 0.100 m<sup>3</sup>/s para la cuenca Mchique. Además, el índice de crecida es 5.20 para la cuenca Anya, y 6.13 para la cuenca Mchique.
- 5.2. En base a la información hidrometeorológica “in situ”, se determinó el balance hídrico superficial de las cuencas Anya y Mchique para la situación actual, y determinados escenarios futuros, demostrando que existe suficiente disponibilidad hídrica a corto, mediano y largo plazo, que permitirá generar proyectos de irrigación de nuevas tierras destinadas a la agricultura, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático.
- 5.3. Se simuló el comportamiento hidrológico de las cuencas Anya y Mchique, mediante los modelos MODSIM y Hec-HMS, respectivamente; este último se calibró y validó considerando la información hidrométrica “in situ” del periodo enero 2012 - junio

2013. En base a ello, se estimó que 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 al 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 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 la cuenca 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.

- 5.4. La población de las cuencas Anya y Mchique es consciente de los problemas económicos, ambientales y sociales relacionados a la problemática de los recursos hídricos de ambas cuencas; mostrándose insatisfechos con el actual manejo del agua, pero dispuestos a participar de actividades que permitan mejorar la calidad, cantidad y oportunidad del recurso, así como el mejoramiento del riego.

## VI. RECOMENDACIONES

- 6.1. Dar a conocer los resultados del presente estudio a los usuarios de riego de las cuencas Anya y Mchique, a través del Proyecto de Cooperación Belga VLIR/UOS – UNALM, a fin de incentivar la elaboración de proyectos de riego a mediano y largo plazo.
- 6.2. 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 automáticas, tensiómetros, equipos para aforo sólido, etc.; con la finalidad de obtener data valiosa para el desarrollo de futuros trabajos de investigación.
- 6.3. Para fines del balance hídrico, la demanda hídrica para el riego se estimó a partir de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones óptimas de humedad del suelo, también llamado evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (FAO, 2006). Asimismo, para un análisis más detallado, debe considerarse la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar, la cual considera un coeficiente de estrés hídrico  $K_s$ .
- 6.4. Monitorear, espacial y temporalmente, la humedad del suelo mediante el uso de equipos TDR (Time Domain Reflectometry), tal como se muestra en la Foto 28 del Anexo 5; para entender a mayor profundidad el complejo proceso de retención de agua en el perfil del suelo, y su relación con las lluvias máximas.
- 6.5. Desarrollar a mayor profundidad el modelo de gestión MODSIM, para las cuencas Anya y Mchique; incorporando el planteamiento de pequeños y medianos reservorios, así como, alternativas de irrigación para las comisiones de riego de las cuencas.



- 6.6. La incorporación de áreas cultivadas en secano a un régimen de riego por gravedad es factible; sin embargo, es un proceso a mediano y largo plazo. Mientras tanto, la aplicación de técnicas como la construcción de zanjas de infiltración, construcción de pequeños reservorios a partir de la configuración natural de la topografía de la zona, regeneración o instalación de pastizales, y reforestación; pueden aliviar, en parte, el déficit de hídrico de las áreas cultivadas en secano.
- 6.7. Las áreas a ser incorporadas al riego fueron determinadas a partir de la disponibilidad hídrica de las cuencas; sin embargo, la superficie real a ser incorporada dependerá, finalmente, del nivel de participación y capacitación de las comisiones de riego, de la técnica de riego aplicada, así como del grado de tecnificación de la infraestructura de riego mayor y menor.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA (Autoridad Nacional del Agua, PE). 2010. Estudio hidrológico de las cuencas Huancané y Suches.
2. Aparicio, J; Lafragua, J.; Gutiérrez, A; Mejía, R; Aguilar, E. 2006. Evaluación de los Recursos Hídricos. Uruguay, Mastergraf. 95 p.
3. Beven, K. 2012. Rainfall - Runoff Modelling. The Primer. 2 ed. United Kingdom, Wiley-Blackwell. 488 p.
4. 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.
5. Cabrera, J. s.f. Calibración de Modelos Hidrológicos (en línea). Lima, Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno el Niño. Consultado 05 may. 2013. Disponible en [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
6. CAZALAC (Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe, CL)/PHI-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.
7. Chow, V; Maidment, D; Mays, L. 1994. Hidrología Aplicada. Colombia, McGraw-Hill. 584 p.
8. CIMIS (California Irrigation Management Information System, US). 2013. Evapotranspiration (en línea). California, US. Consultado 2 ago. 2013. Disponible en <http://www.cimis.water.ca.gov>
9. Cortés, A. 2010. Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en una ciudad de media montaña andina. Caso de estudio: Manizales. Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. 90 p.

10. CVC (Corporación Autónoma del Valle del Cauca, CO). 2005. Manual de procedimientos hidrométricos. Colombia, s.e. 13 v. 165 p.
11. Davie, T. 2008. Fundamentals of hydrology. 2 ed. London, Routledge. 199 p.
12. DIRCETUR JUNIN (Dirección Regional de Comercio Exterior y Turismo Junín, PE). 2009. Inventario de los recursos naturales del distrito de Sincos.
13. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2006. Manual N° 56 Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, s.e. 298 p. (ISBN 92-5-304219-2).
14. Finger, D. 2011. Hydrological Processes and Modelling: Calibration of Hydrological Models. Switzerland. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.
15. 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.
16. González del Tanago, M; García de Jalón, D. 1998. Restauración de ríos y riberas. España, Mundiprensa. 319 p.
17. Haller, A. 2012. Vivid valleys, pallid peaks? Hypsometric variations and rural - urban land change in the Central Peruvian Andes. Applied Geography. 35(2012): 439-447.
18. IGP (Instituto Geofísico del Perú). 2005. Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la Cuenca del Río Mantaro (en línea). Lima, Consejo Nacional del Ambiente. Consultado 20 jun. 2013. Disponible en <http://www.met.igp.gob.pe/proyectos/incagro/datos/manual.pdf>
19. IGP (Instituto Geofísico del Perú). 2010. Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes Centrales Peruanos (en línea). Lima, IGP Consultado 20 jun. 2013. Disponible en <http://www.met.igp.gob.pe/proyectos/incagro/datos/ManualConsuntivo.pdf>
20. IGP (Instituto Geofísico del Perú). 2010. Primera aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelo agrícola en el Valle del Mantaro (en línea). Lima, IGP Consultado 20 jun. 2013. Disponible en <http://www.met.igp.gob.pe/proyectos/incagro/datos/manual.pdf>
21. INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática, PE)/ MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego, PE). 2013. IV Censo Nacional Agropecuario: Base de datos

- REDATAM (en línea). Consultado 25 ago. 2013. Disponible en <http://desa.inei.gob.pe/Cenagro/redatam/?id=CensosNacionales>
22. INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática, PE)/UNFPA (Fondo de Población de las Naciones Unidas). 2010. Mapa de pobreza Provincial y Distrital 2009. Lima. s.e. 288 p.
  23. INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática, PE). Estimaciones y proyecciones de la población por sexo, según Departamento, Provincia y Distrito, 2000 – 2015 (en línea). 2009. Consultado 18 jun. 2013. <http://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0842/index.htm>
  24. INGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, PE). 1994. Mapa geológico del cuadrángulo de Jauja. Lima, PE. Esc. 1:100,000. Color.
  25. INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales, PE)/PSI (Programa Subsectorial de Irrigaciones, PE). 2005. Manual de hidrometría. Perú, s.e. 26 p.
  26. Klemes, V. 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*. 31:1, 13-24.
  27. Koch, R. Bene, K. 2013. Continuous hydrologic modeling with HMS in the Aggtelek Karst región. *Science Publishing Group*. 1(1):1-7.
  28. Labadie, J. 2010. MODSIM 8.1 River basin management decision support system: technical apendices. United States of America. s.e. 38 p.
  29. Labadie, J. 2010. MODSIM 8.1: River basin management decision support system: user manual and documentation. United States of America. s.e. 123 p.
  30. Lafuente, J. 2003. Modelos para la precipitación diaria en el marco de los modelos lineales generalizados. Departamento de Métodos Estadísticos. Universidad de Zaragoza. 311 p.
  31. López, F. 2003. La Ingeniería en los procesos de desertificación. España, Grupo Tasga. 1045 p. (ISBN 848-47-61-134)
  32. Maidment, D. 1993. Handbook of Hydrology. United States of America, McGraw-Hill. 1424 p.
  33. Martinez, F. 2002. Preferencias de microhábitat de *Barbus bocagei*, *Chondrostoma polylepis* y *Leuciscus pyrenaicus* en la cuenca del río Tajo. Consultado 18 abr. 2013. Disponible en [http://www.revistaecosistemas.net/index\\_frame.asp?pagina=http%3A/www.%20revistaecosistemas.net/articulo.asp%3Fid%3D318.%20Fecha%20de%20consulta:%208-10-2009](http://www.revistaecosistemas.net/index_frame.asp?pagina=http%3A/www.%20revistaecosistemas.net/articulo.asp%3Fid%3D318.%20Fecha%20de%20consulta:%208-10-2009)

34. McEnroe, B. 2010. Guidelines for Continuous Simulation of Streamflow in Johnson County, Kansas, with HEC-HMS (en línea). Kansas, Johnson County Public Works and Infrastructure Stormwater Management Program Consultado 16 jun. 2013. Disponible en <http://www.jocogov.org/sites/default/files/documents/PWK/continuous-simulation-with-HEC-HMS.pdf>
35. Milano, M; Ruelland, D; Dezetter, A; Fabre, J; Ardoin-Bardin, S; Servat, E. 2013. Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*. 500(2013): 114-126.
36. Molnar, P. 2011. Watershed modelling: Calibration. Switzerland. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.
37. Morales, P. 2013. El Análisis Factorial en la construcción e interpretación de tests, escalas y cuestionarios (en línea). Madrid, Universidad Pontificia Comillas Consultado 18 abr. 2013. Disponible en <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/AnalisisFactorial.pdf>
38. Odiyo, J; Phangisa, J; Makungo, R. 2012. Rainfall–runoff modelling for estimating Latonyanda River flow contributions to Luvuvhu River downstream of Albasini Dam. *Physics and Chemistry of the Earth*. 50-52(2012): 5-13.
39. OMM (Organización meteorológica mundial, CH). 2011. Guía de prácticas hidrológicas N°168. 6 ed. Suiza, s.e. 781 p. (ISBN 978-92-63-30168-0).
40. OMM (Organización meteorológica mundial, CH). 2010. Manual de aforo de caudales N° 1044. Switzerland, s.e. 252 p. (ISBN 978-92-63-11044-2).
41. Onset Computer Corporation. 2005. Data logging rain gauge RG3 and RG3-M User's Manual (en línea). Consultado 23 feb. 2013. Disponible en <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/rg3>
42. Orang, M; Snyder, R; Geng S. Hart Q; Sarresteh, S; Falk, M. Beaudette, D; Hayes, S; Eching, S. 2013. California Simulation of Evapotranspiration of Applied Water and Agricultural Energy Use in California. *Journal of Integrative Agriculture*. 12(8): 1371-1388.
43. Pang, B; Xu, Z; Wu, W. 2012. Estimation of the ecological base flow of Wei River in Shaanxi province. *Procedia Environmental Sciences*. 13(2012): 1559-1568.
44. Análisis de las condiciones de aprovechamiento de los recursos hídricos en la cuenca de los ríos Saja-Besaya (en línea). 2012. Consultado el 16 ago. 2013. Disponible en <http://dma.medioambiente.cantabria.es/planes/abastecimiento/Anejo%>

[20VI%20Modelo%20de%20gestion.pdf](#)

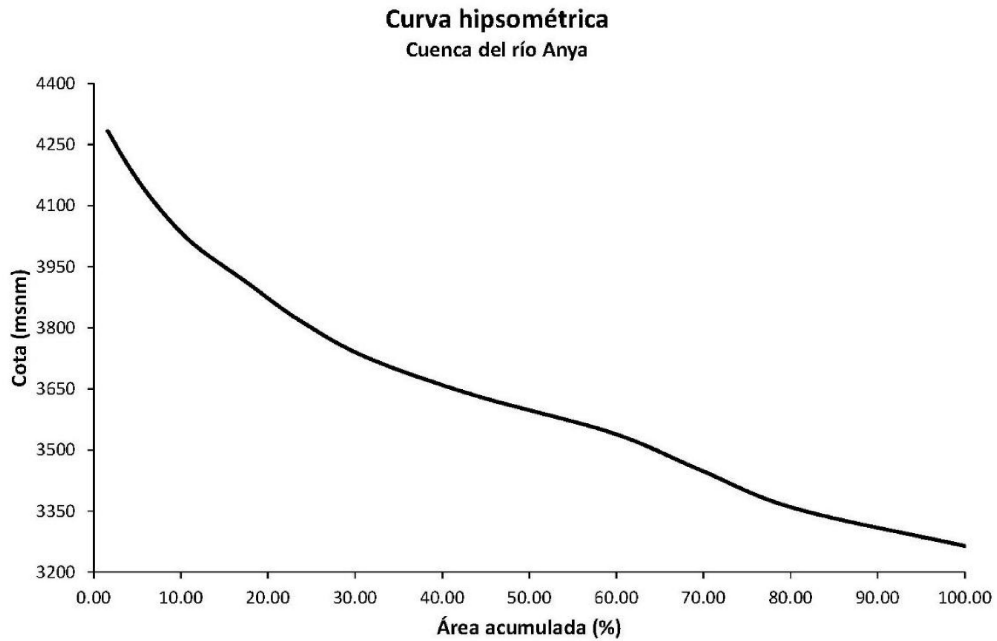
45. Pedraza, R. 2007. Efectos de escala sobre la simulación del flujo de agua superficial en áreas urbanas usando modelos basados en la onda cinemática. Doctor en ciencias de la Ingeniería. Universidad de Córdoba. 274 p.
46. Raghunath, H. 2006. Hydrology. 2 ed. United States of America, New age International Publishers. 457 p.
47. Refsgaard, J; Knudsen, J. 1996. Water Resources Research: Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. s.l. s.e. v. 32, p 2189 – 2202.
48. Salgado, J; Güitrón de los Reyes, A. 2012. Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos (en línea). Acapulco, MX. Consultado 05 may. 2013. Disponible en [http://www.revistatlaloc.org.mx/amh\\_congreso/articulos/legislacionydocencia/319APLICABILIDAD\\_DE\\_LOS\\_MODELOS\\_HIDROLOGICOS\\_DISTRIBUIDO\\_S\\_AMH.pdf](http://www.revistatlaloc.org.mx/amh_congreso/articulos/legislacionydocencia/319APLICABILIDAD_DE_LOS_MODELOS_HIDROLOGICOS_DISTRIBUIDO_S_AMH.pdf)
49. Salvador Figueras, M; Gargallo, P. 2003. Análisis exploratorio de datos (en línea). Zaragoza, Universidad de Zaragoza. Consultado 23 feb. 2013. Disponible en <http://www.5campus.com/leccion/aed>
50. Tharme, R. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. River Research and Applications. 19:397.441.
51. Tukey, W.J. 1977. Exploratory data analysis. United States of America, Addison-Wesley.
52. Urrutia, J; Palomino, R. 2010. Componentes principales en la determinación de estaciones con patrones homogéneos de temperatura en el Chocó. Scientia et Technica. 45: 257-262.
53. US Army Corps of Engineers. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. United States of America, s.e. 138 p.
54. US Army Corps of Engineers. 2010. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual. United States of America, s.e. 306 p.

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Del comportamiento de la precipitación total diaria y caudales medios diarios

#### Anexo 1.1: Del análisis cartográfico y exploratorio de la información

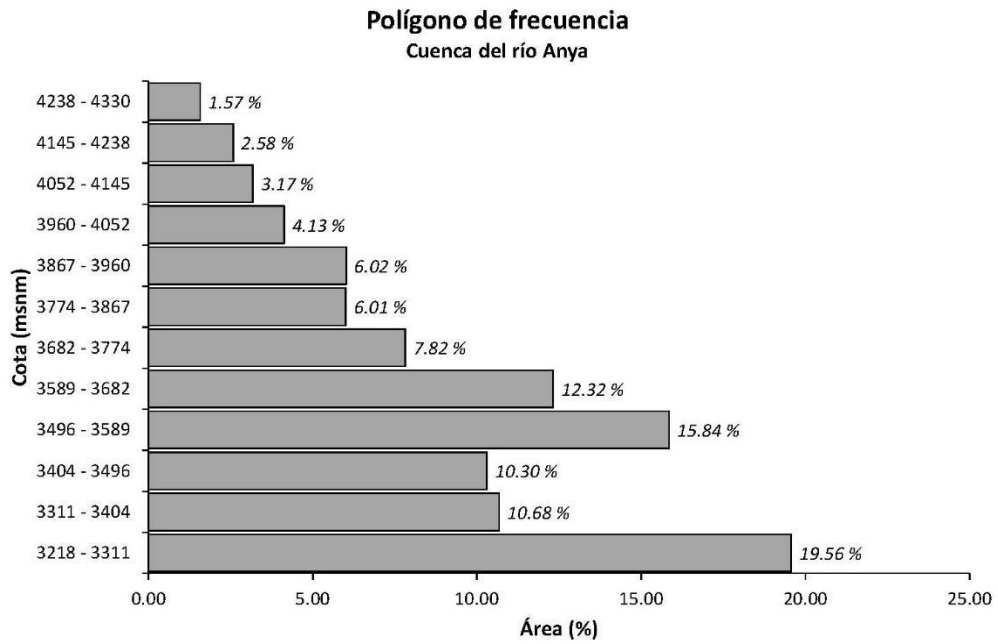
##### a. Geomorfología de las cuencas Anya y Mchique



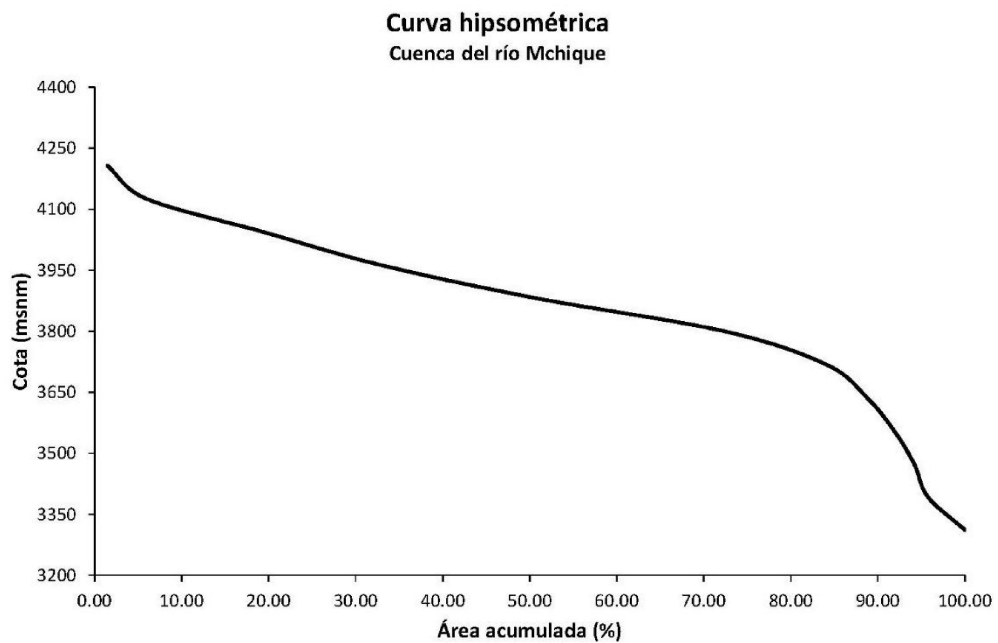
**Figura 35:** Curva hipsométrica de la cuenca del río Anya



**Figura 36:** Rectángulo equivalente de la cuenca del río Anya



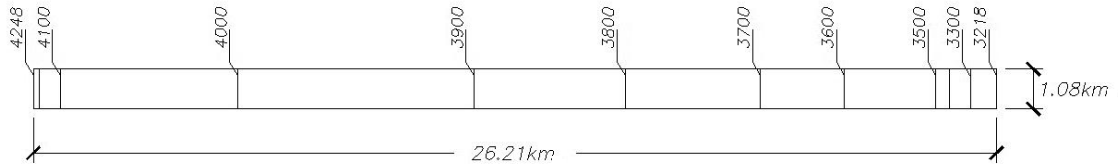
**Figura 37:** Polígono de frecuencia de alturas de la cuenca del río Anya



**Figura 38:** Curva hipsométrica de la cuenca del río Mchique

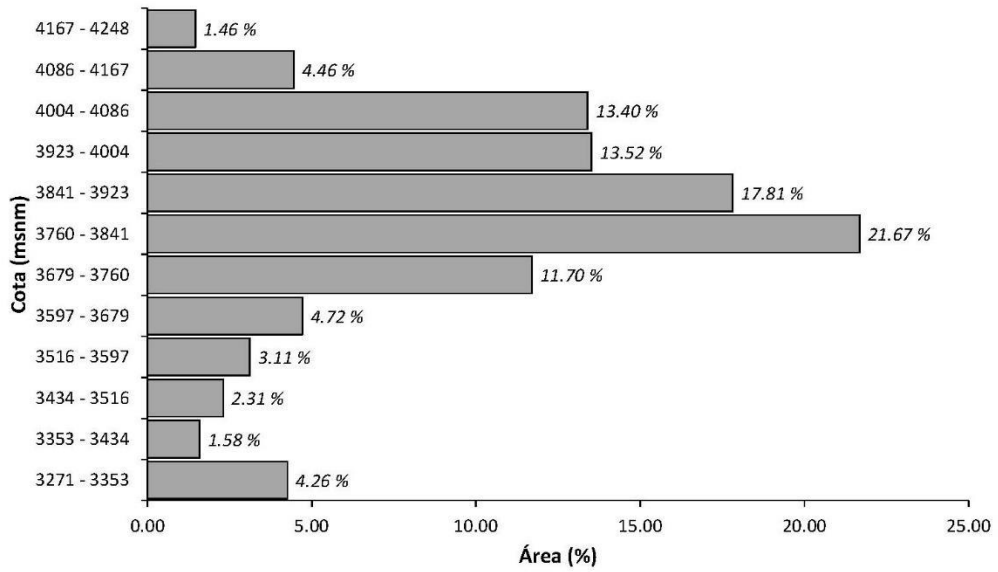


**Rectángulo equivalente**  
**Cuenca del río Mchique**



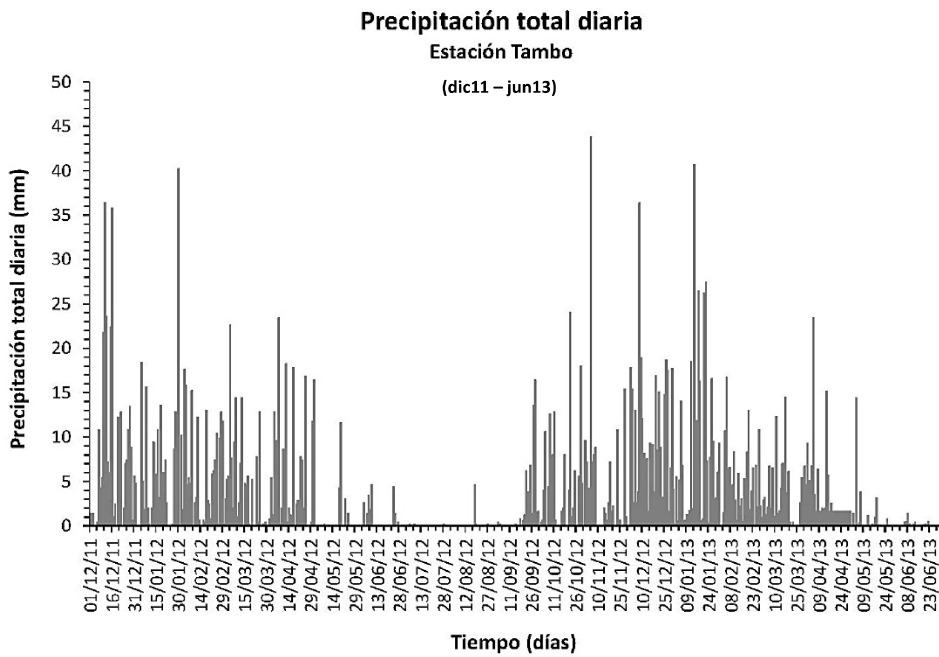
**Figura 39:** Rectángulo equivalente de la cuenca del río Mchique

**Polígono de frecuencia**  
**Cuenca del río Mchique**

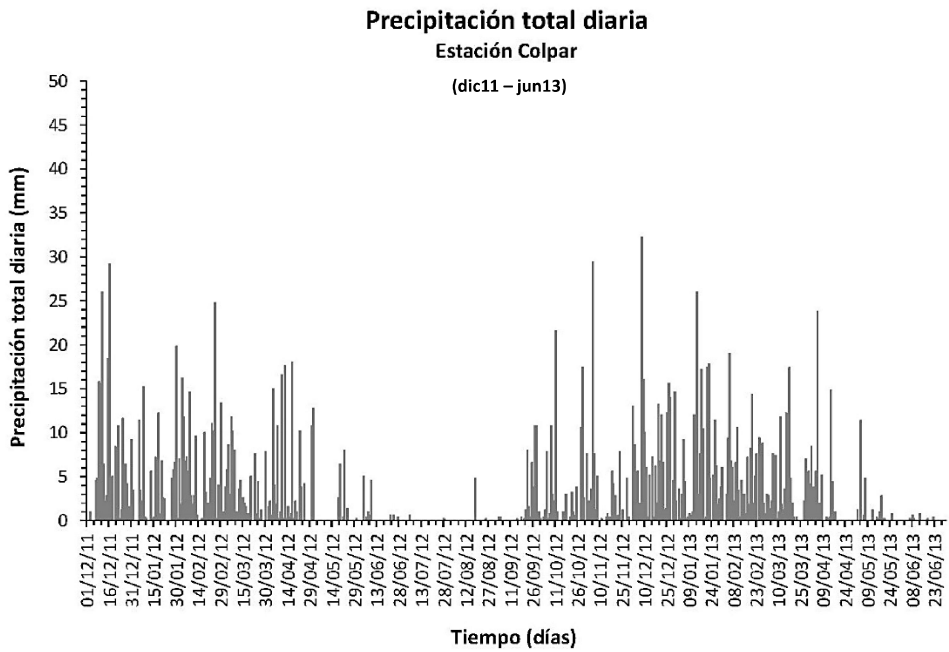


**Figura 40:** Polígono de frecuencia de alturas de la cuenca del río Mchique

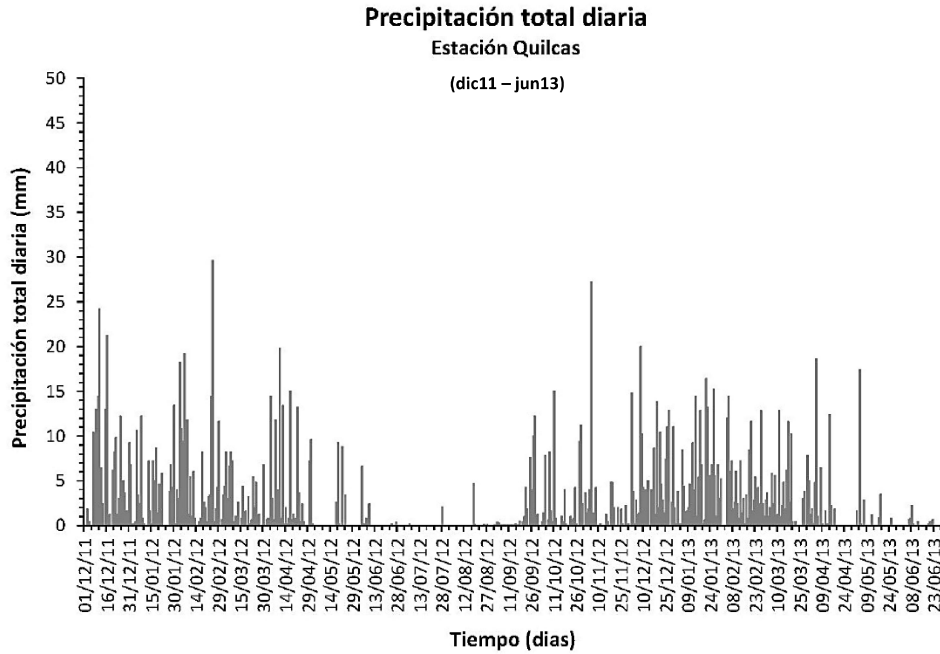
**b. Análisis exploratorio de datos**  
***Serie de precipitación total diaria (mm)***



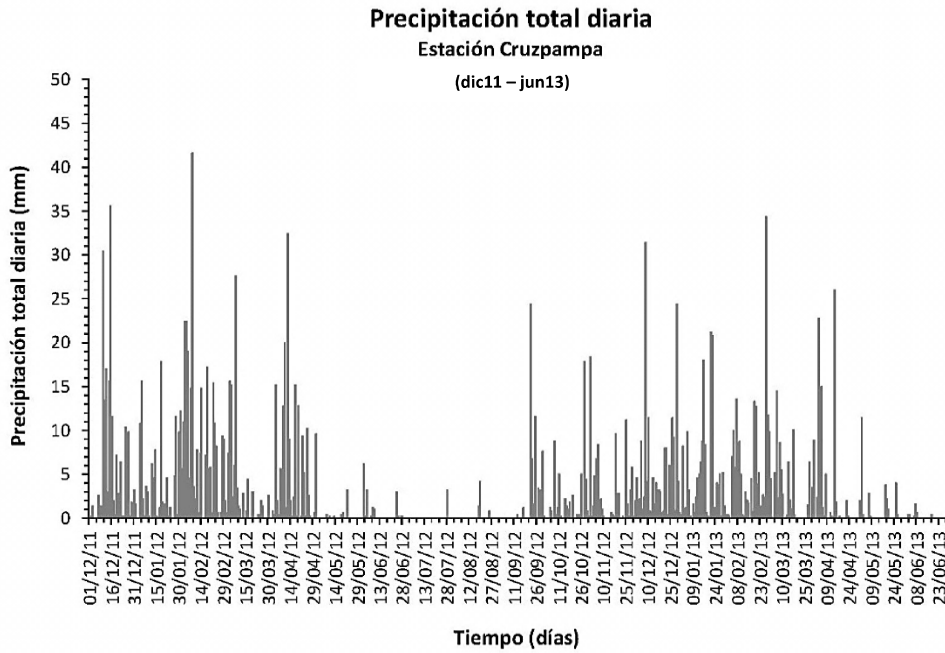
**Figura 41:** Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Tambo



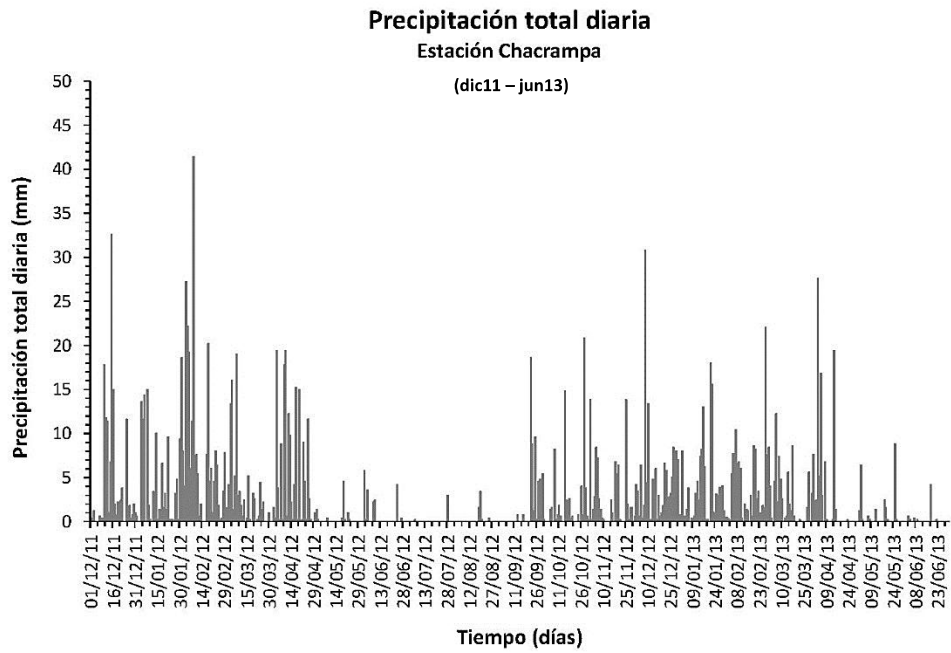
**Figura 42:** Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Colpar



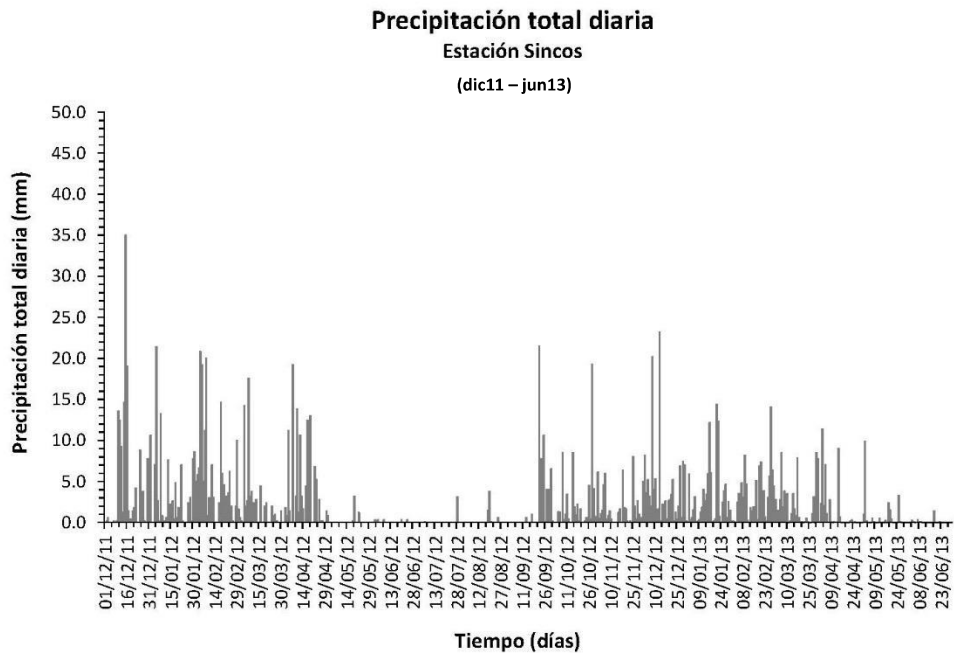
**Figura 43:** Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Quilcas



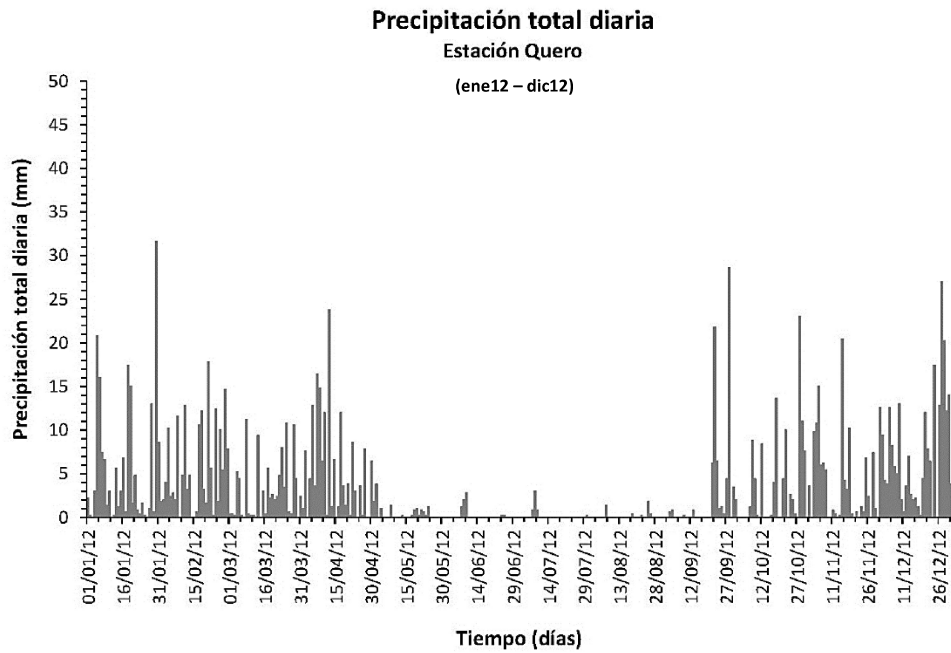
**Figura 44:** Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Cruzpampa



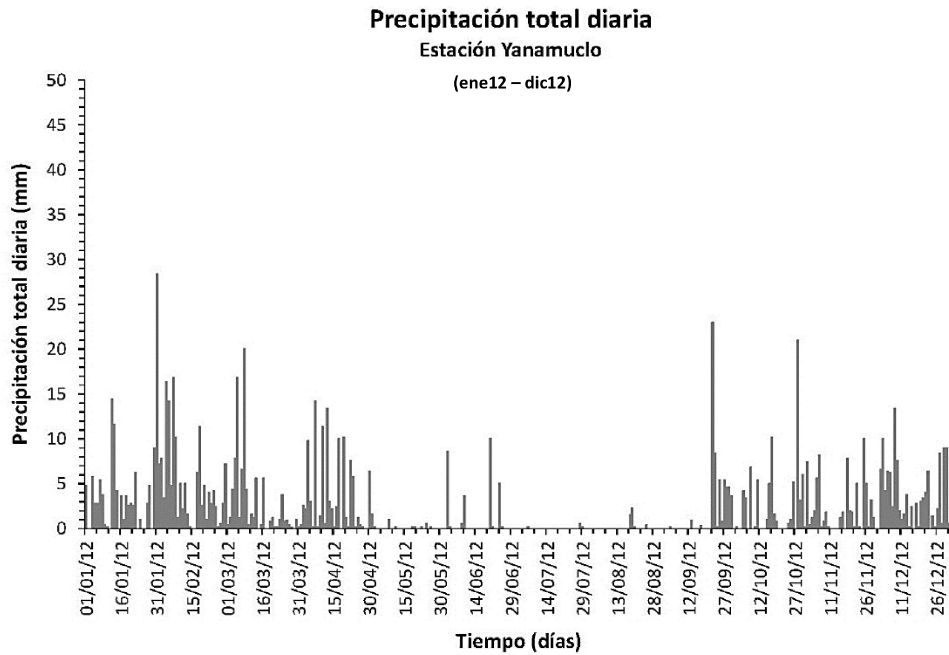
**Figura 45:** Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Chacampa



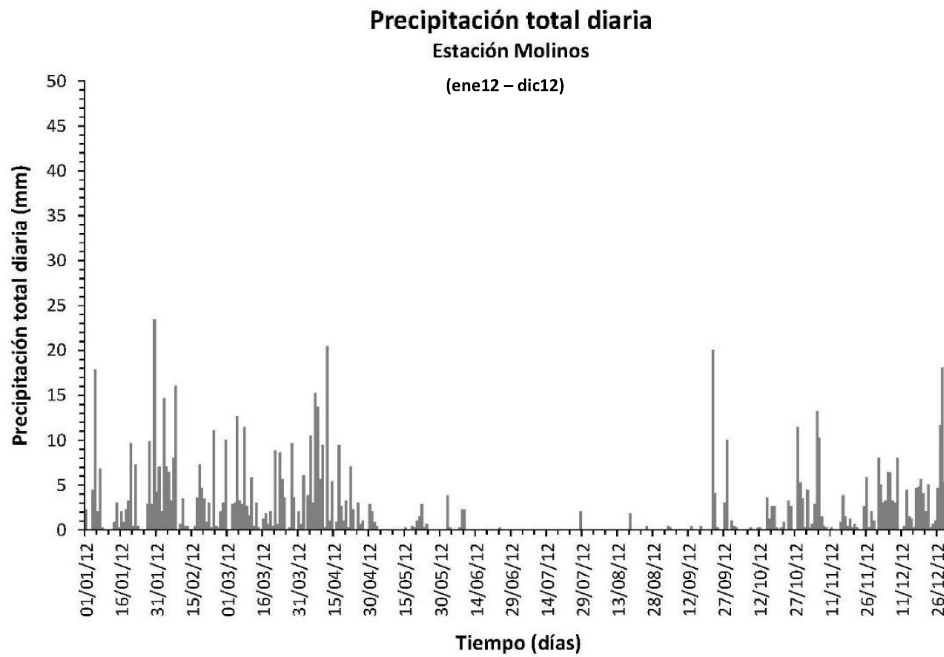
**Figura 46:** Serie de precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Sincos



**Figura 47:** Serie de precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Quero

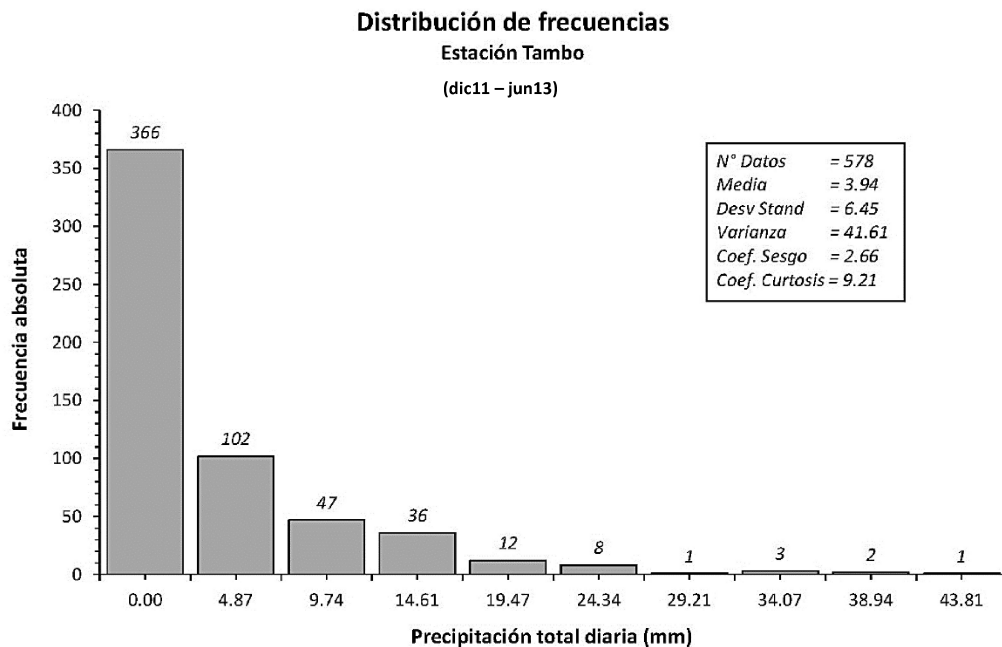


**Figura 48:** Serie de precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Yanamuelo

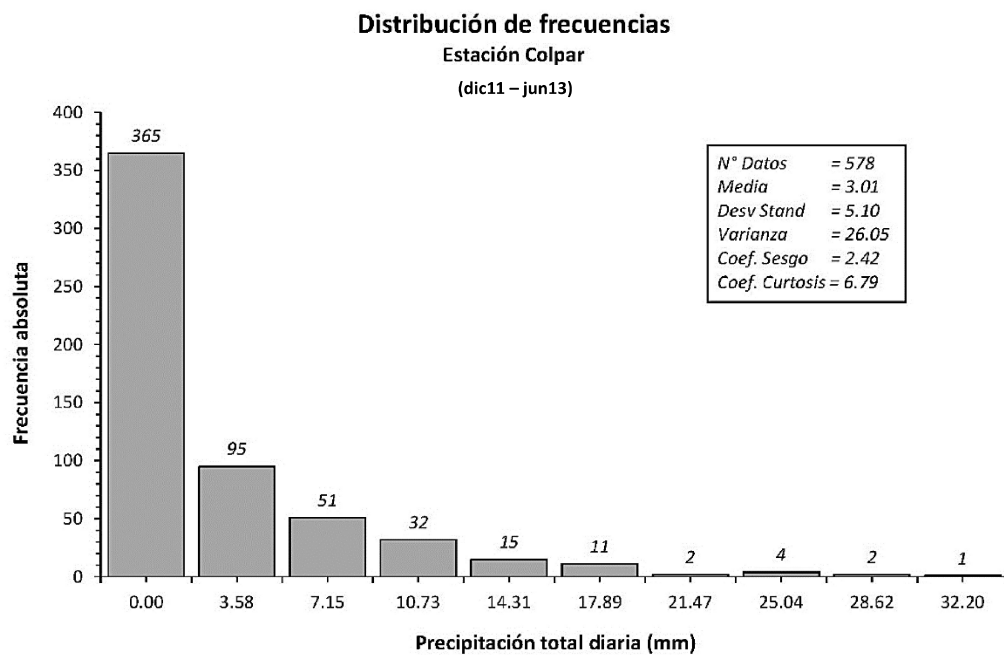


**Figura 49:** Serie de precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Molinos

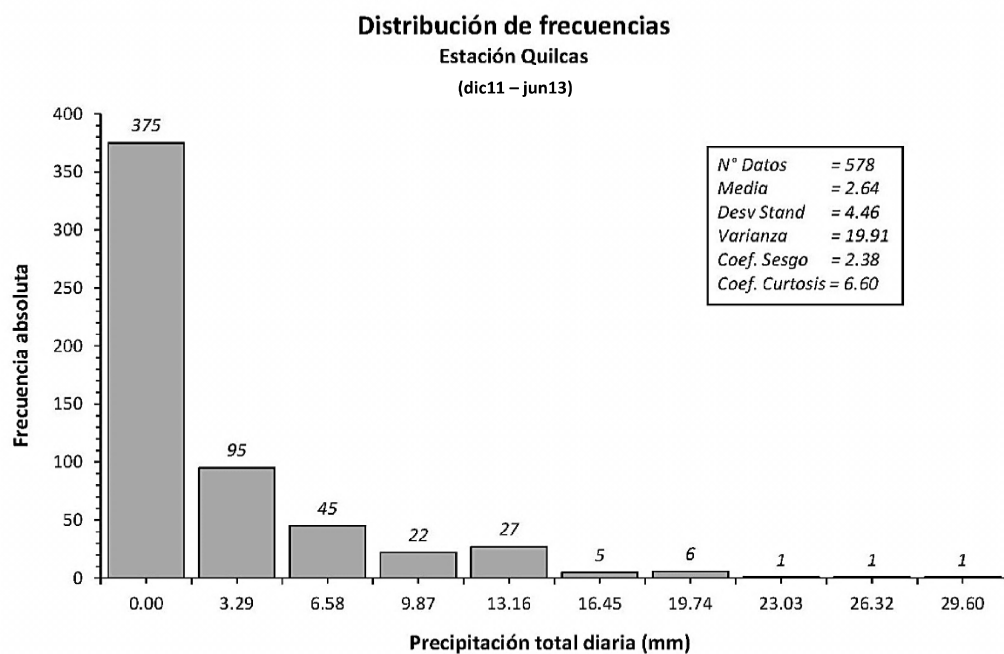
*Histogramas de las series de precipitación total diaria*



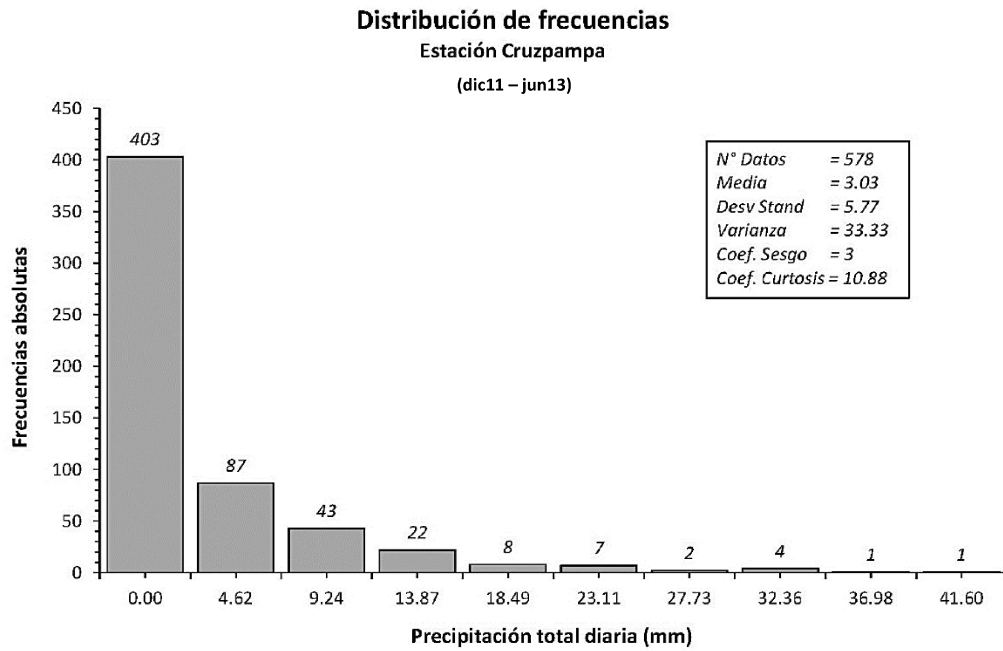
**Figura 50:** Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Tambo



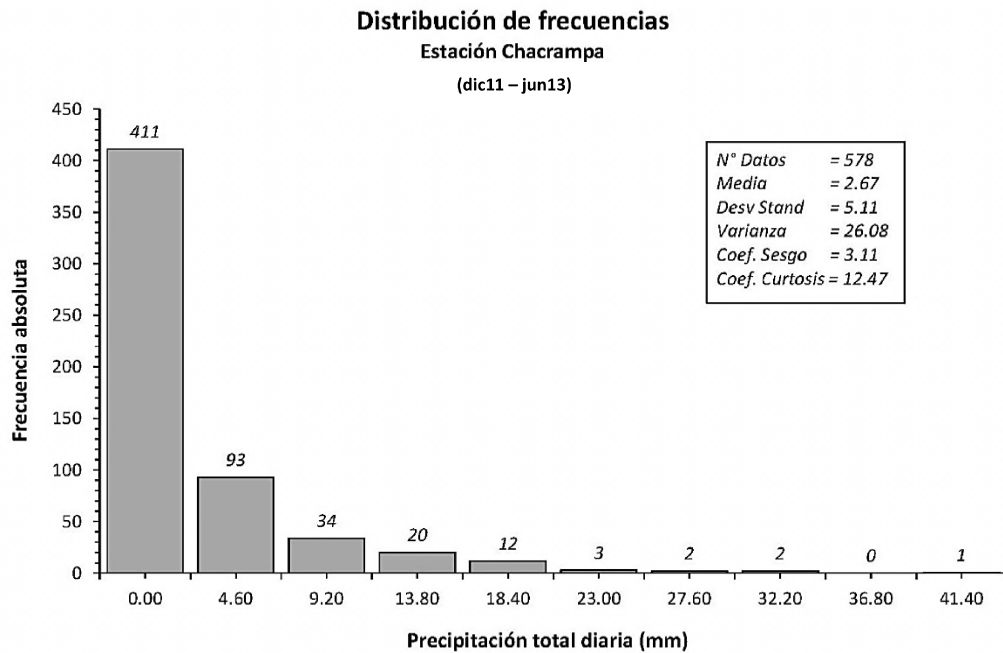
**Figura 51:** Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Colpar



**Figura 52:** Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Quilcas

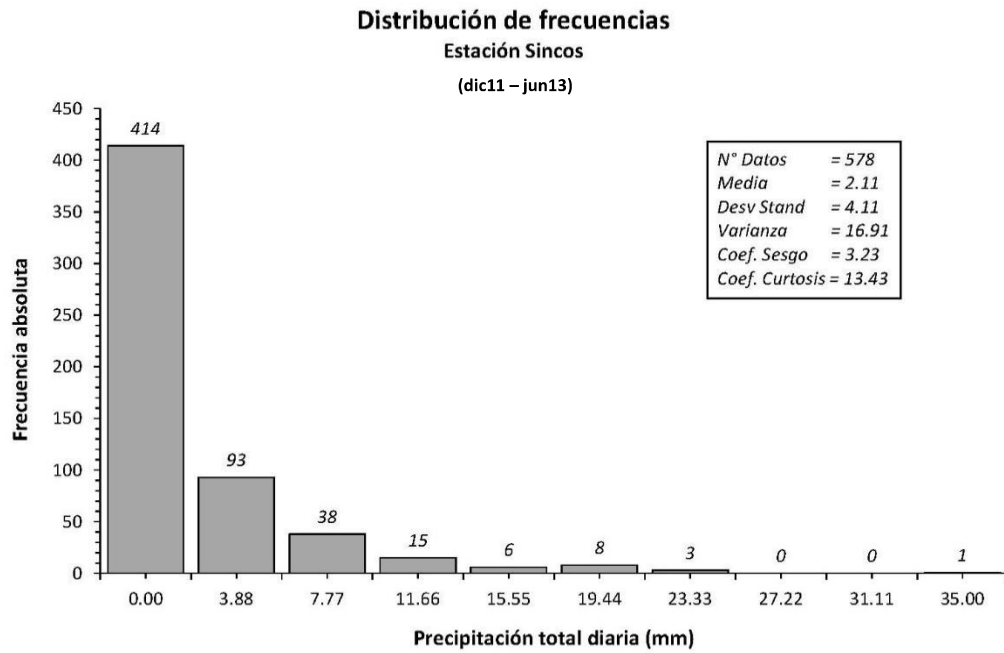


**Figura 53:** Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Cruzpampa

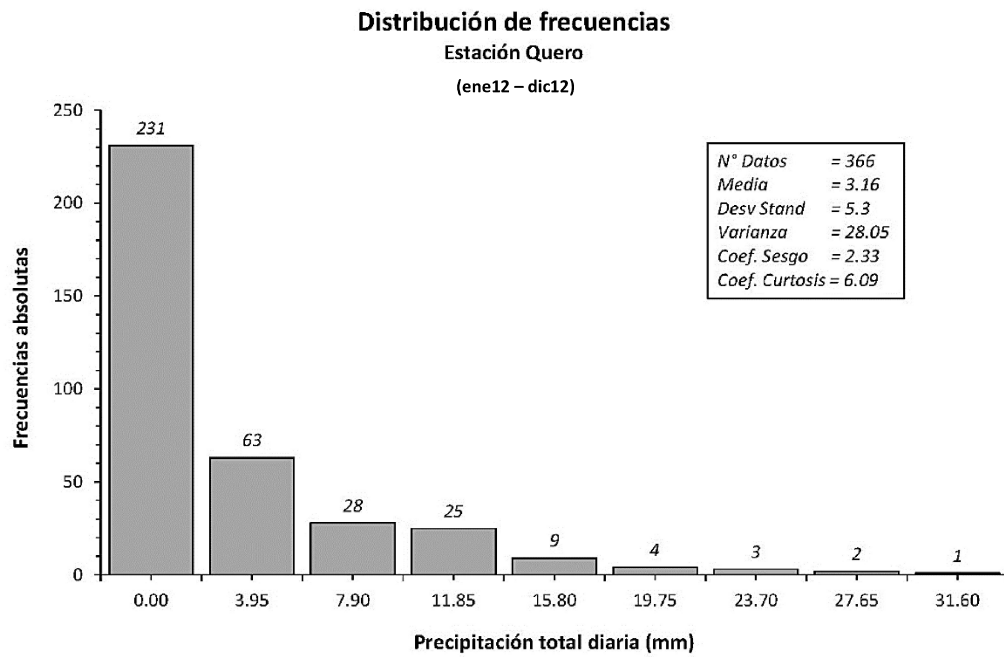


**Figura 54:** Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Chacrapampa

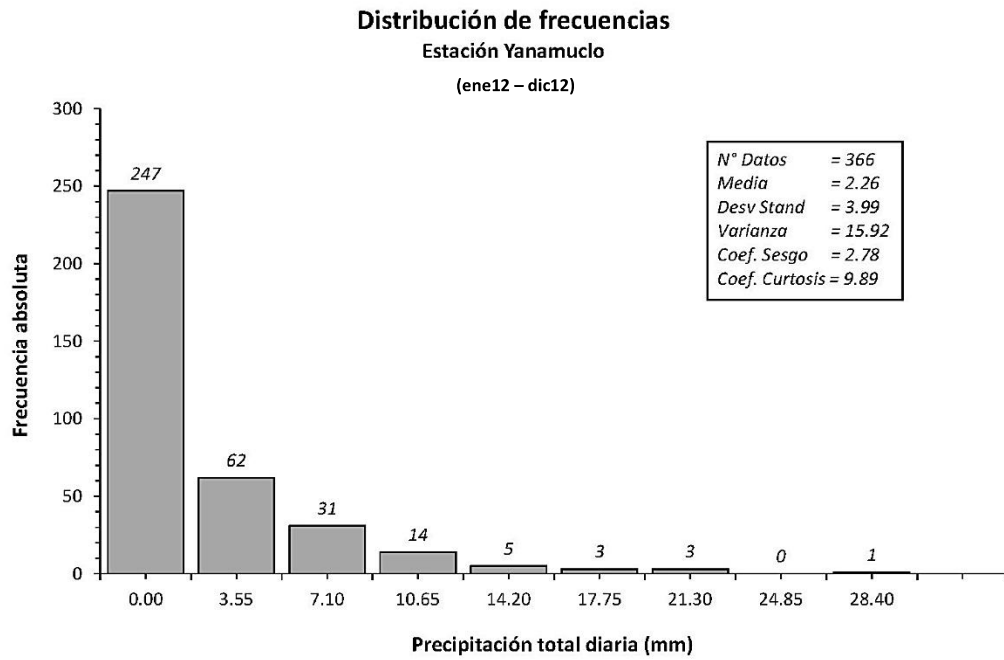




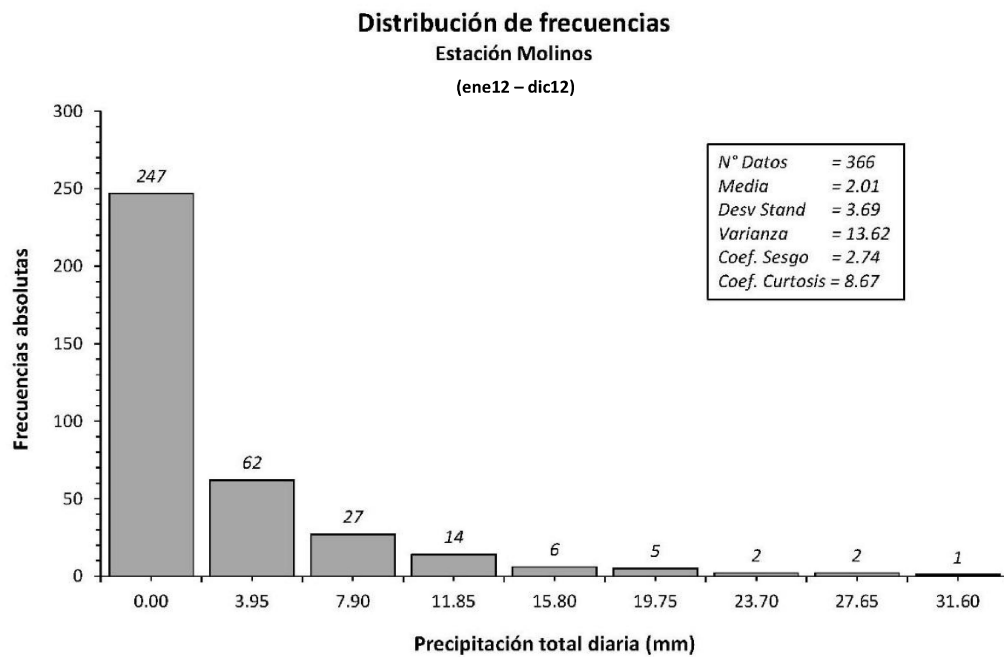
**Figura 55:** Histograma de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Sincos



**Figura 56:** Histograma de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Quero



**Figura 57:** Histograma de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Yanamuclo



**Figura 58:** Histograma de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Molinos

### Diagrama de cajas de las series de precipitación total diaria

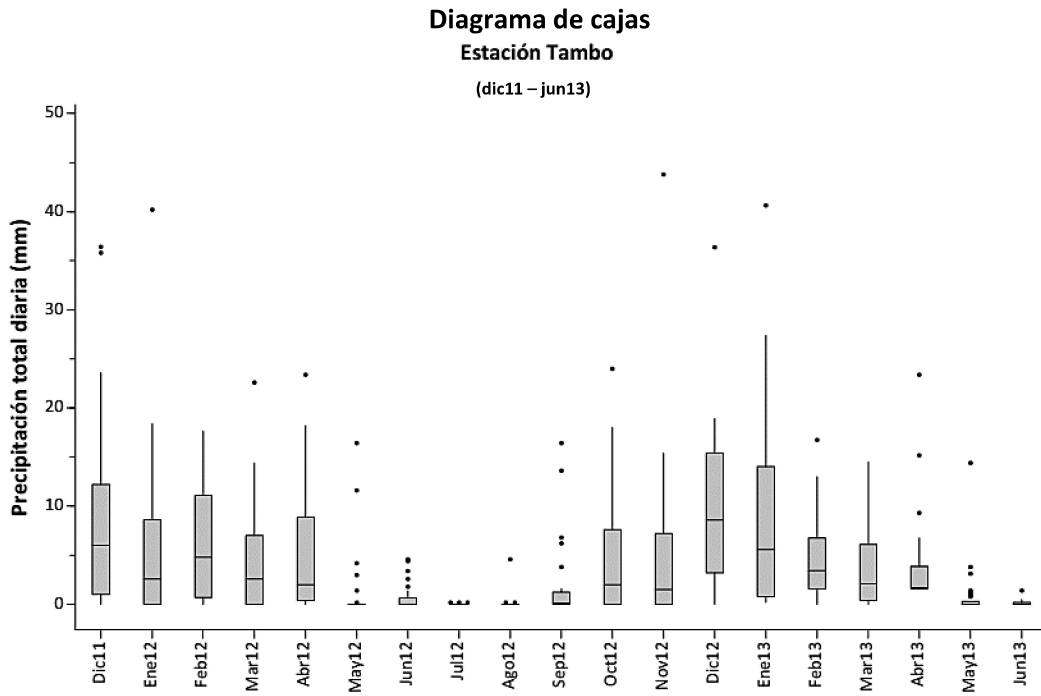


Figura 59: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Tambo

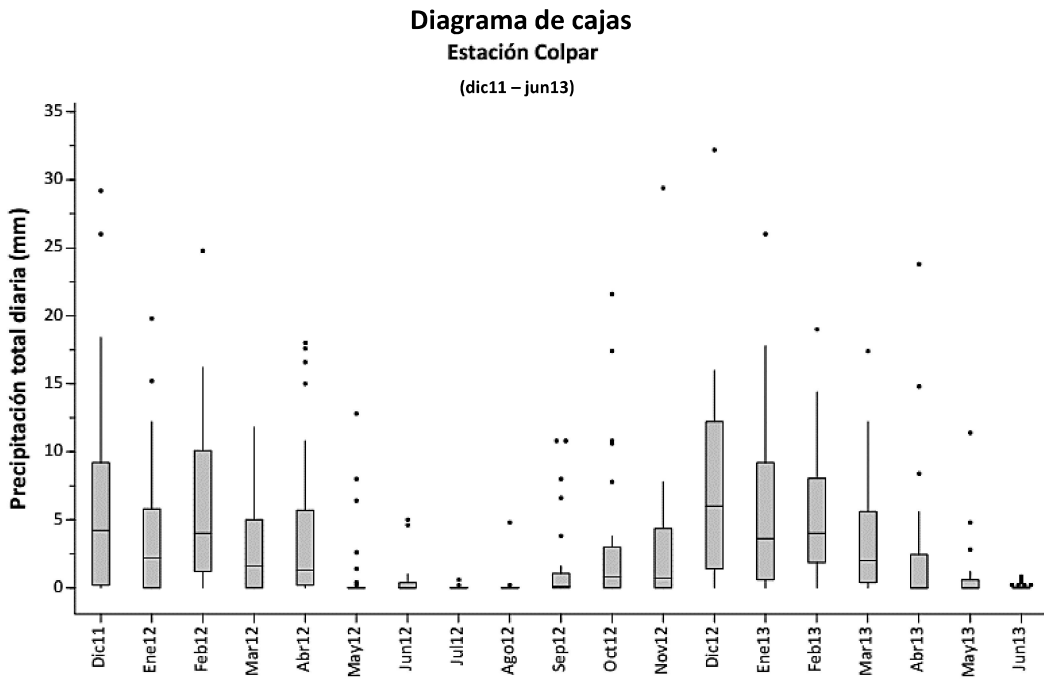
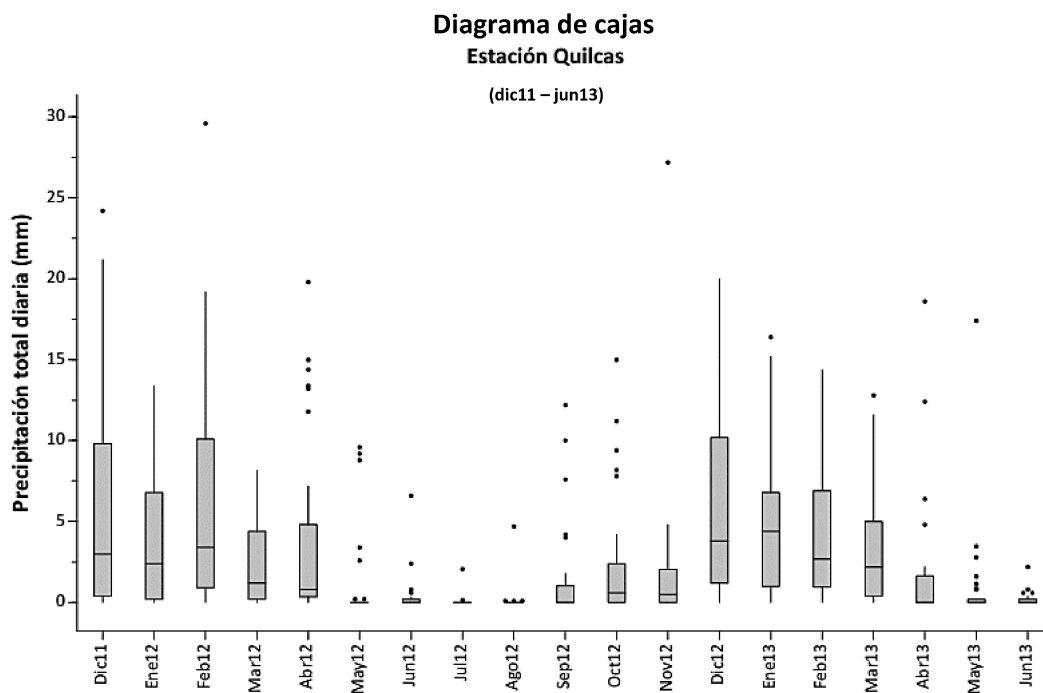
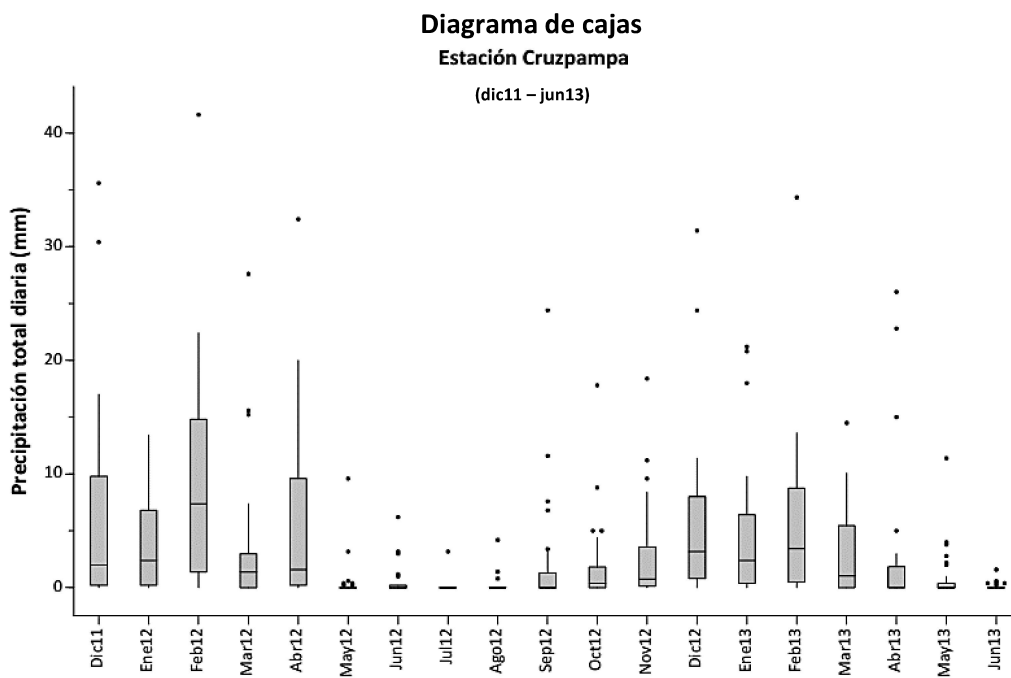


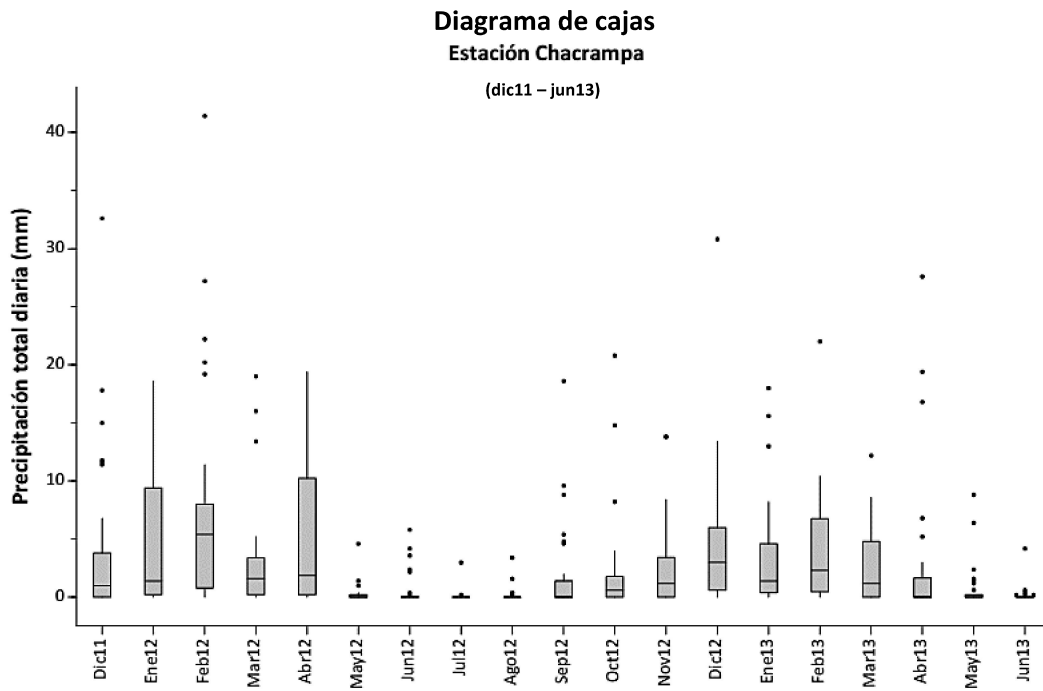
Figura 60: Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Colpar



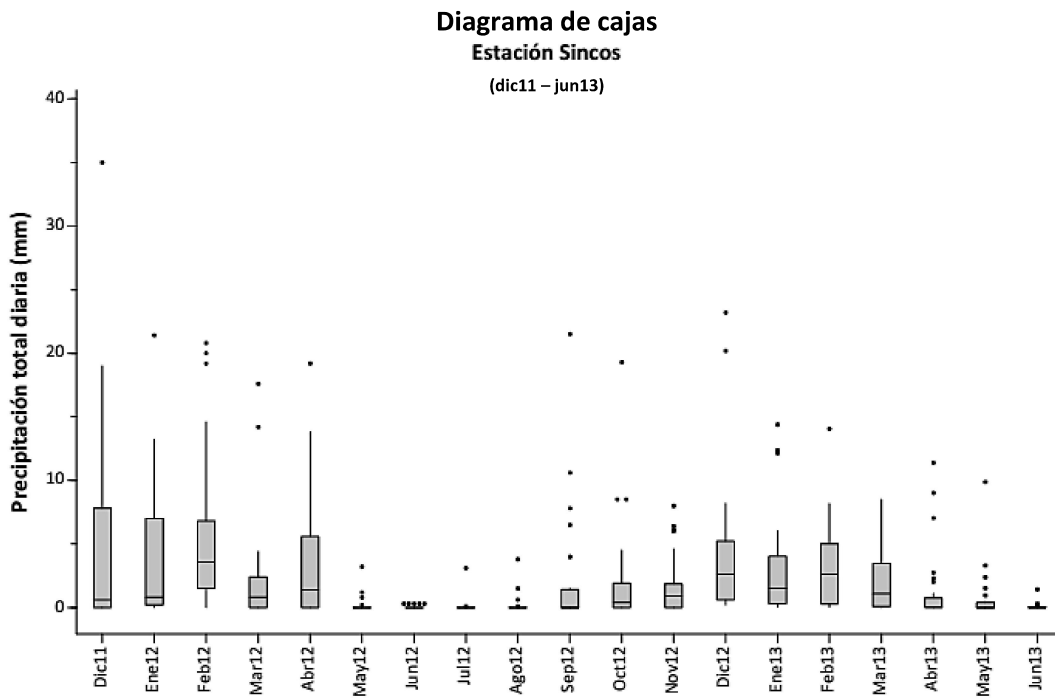
**Figura 61:** Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Quilcas



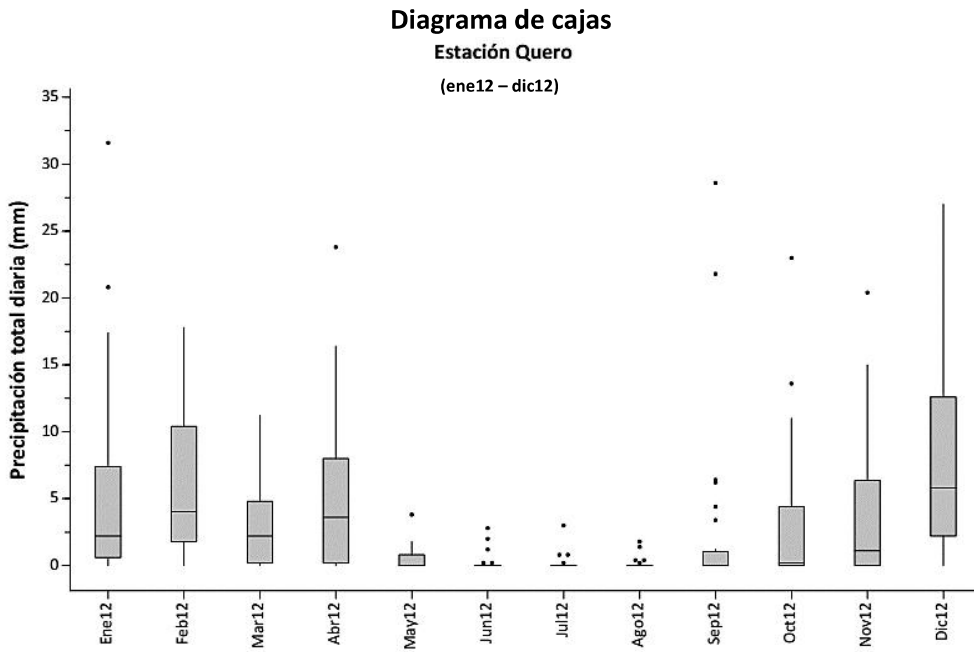
**Figura 62:** Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Cruzpampa



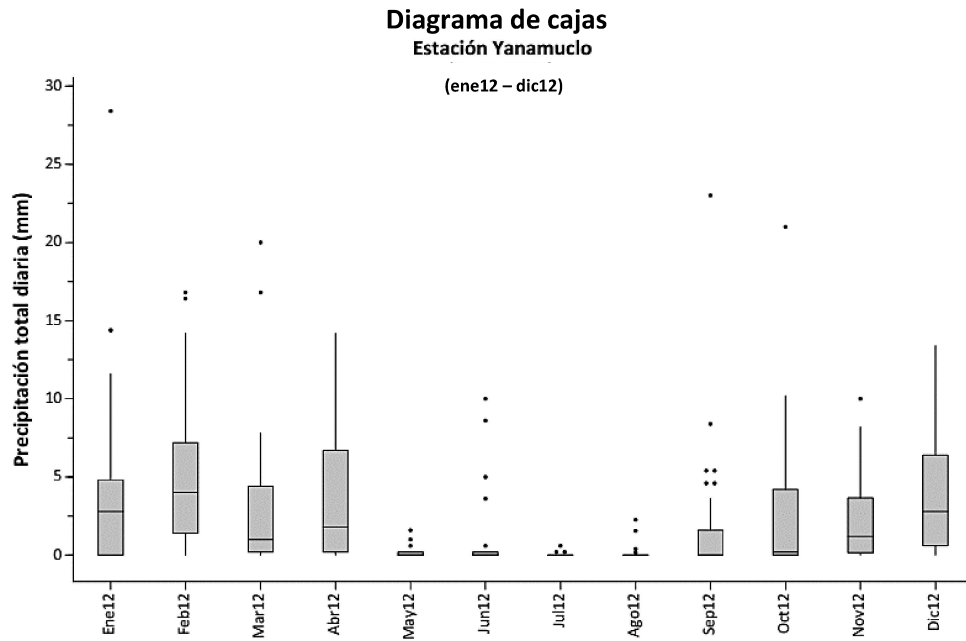
**Figura 63:** Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Chacrampa



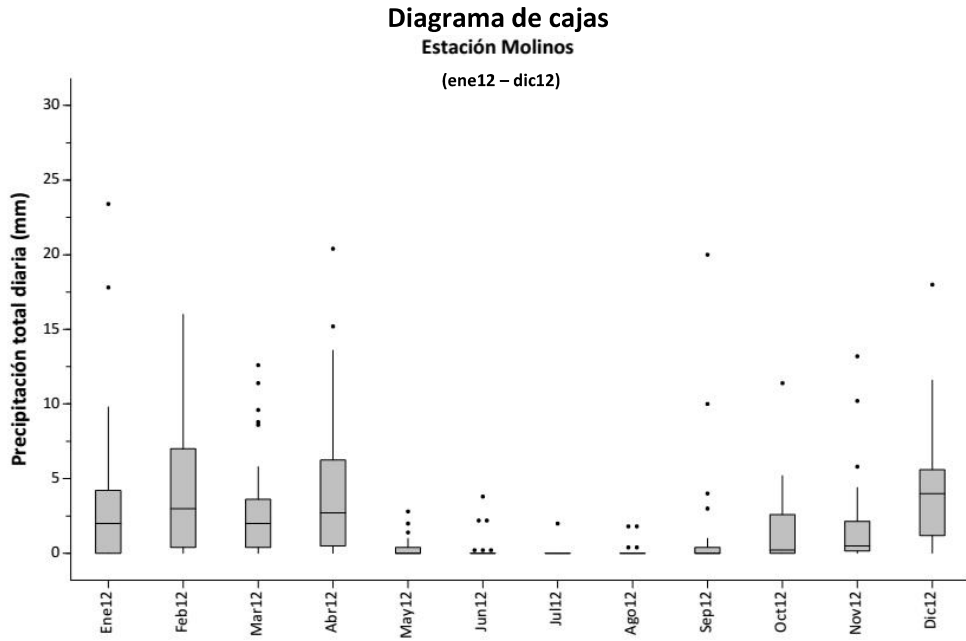
**Figura 64:** Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (dic11 – jun13), estación Sincos



**Figura 65:** Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Quero

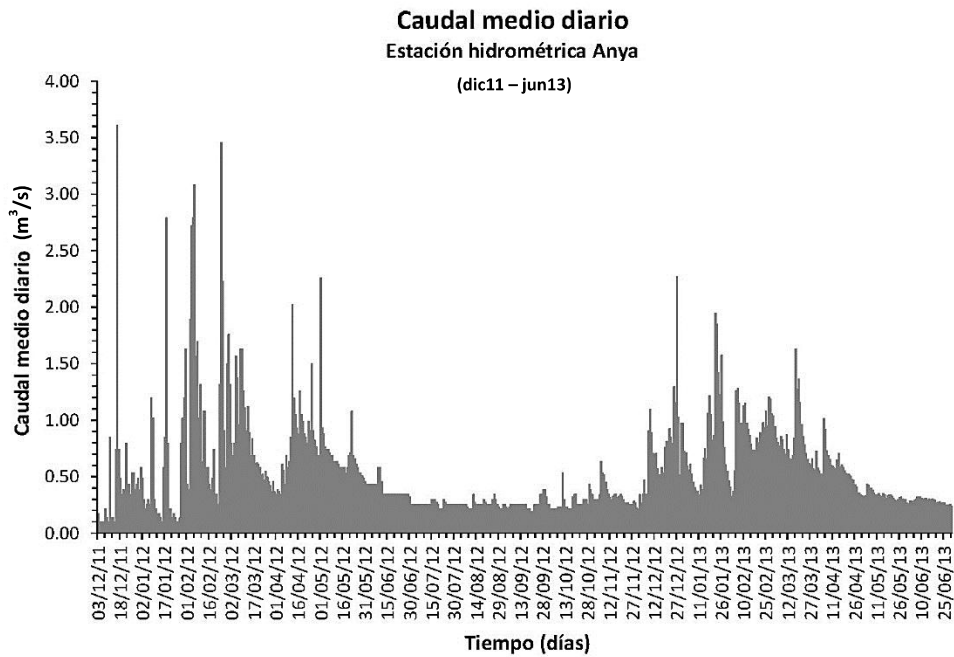


**Figura 66:** Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Yanamuclo

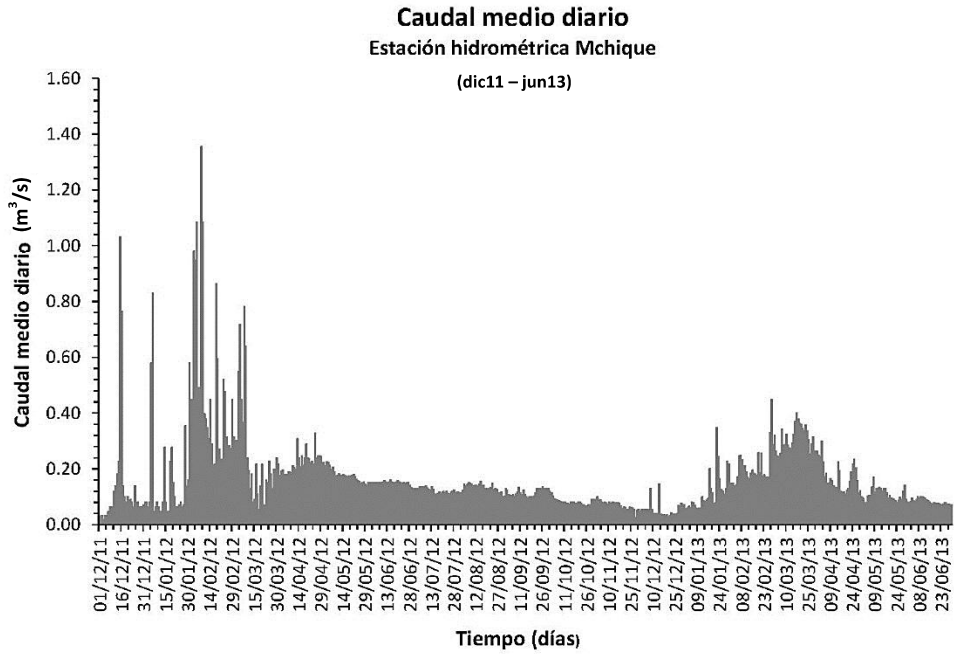


**Figura 67:** Diagrama de cajas de la precipitación total diaria (ene12 – dic12), estación Molinos

*Series de caudales medios diarios observados ( $m^3/s$ )*

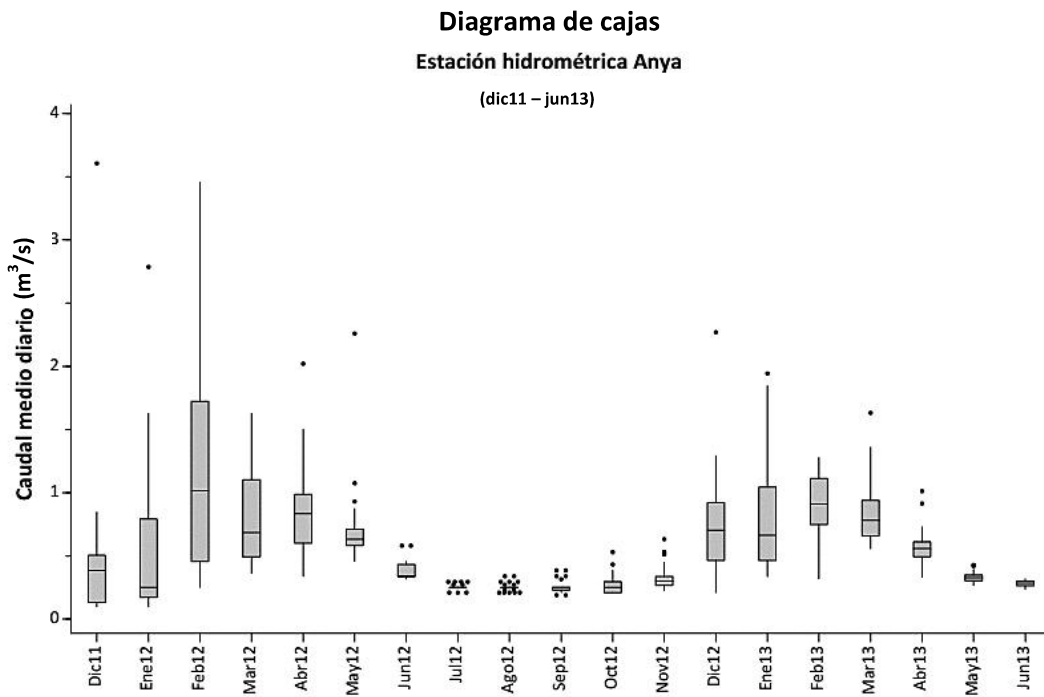


**Figura 68:** Serie del caudal medio diario (dic11 – jun13), estación Anya



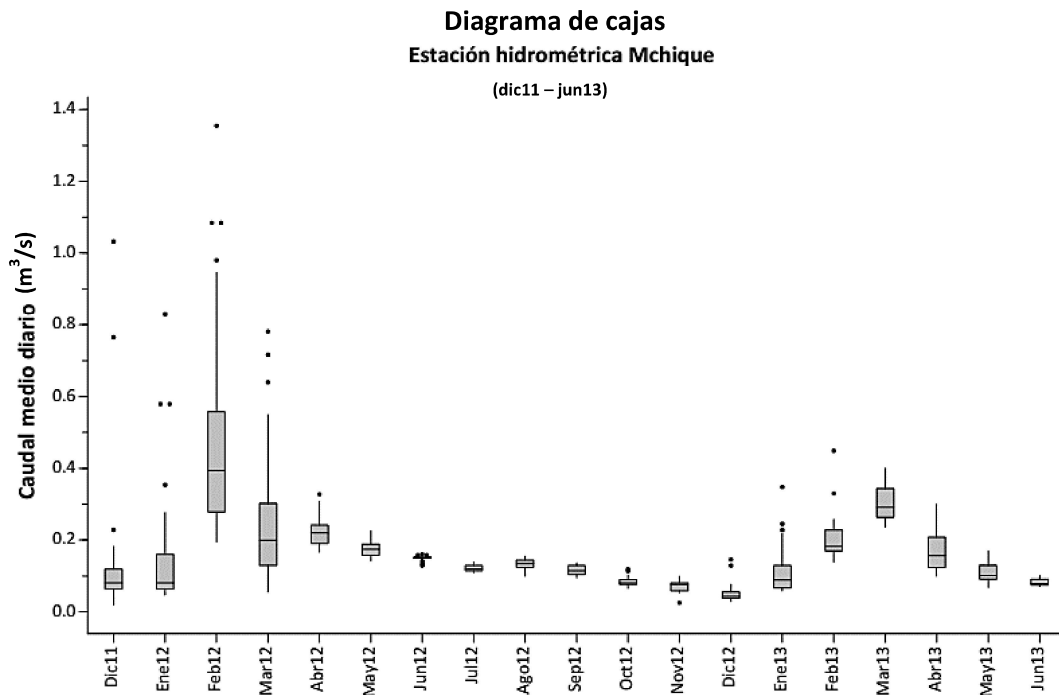
**Figura 69:** Serie del caudal medio diario (dic11 – jun13), estación Mchique

*Diagrama de las series de caudales medios diarios observados*



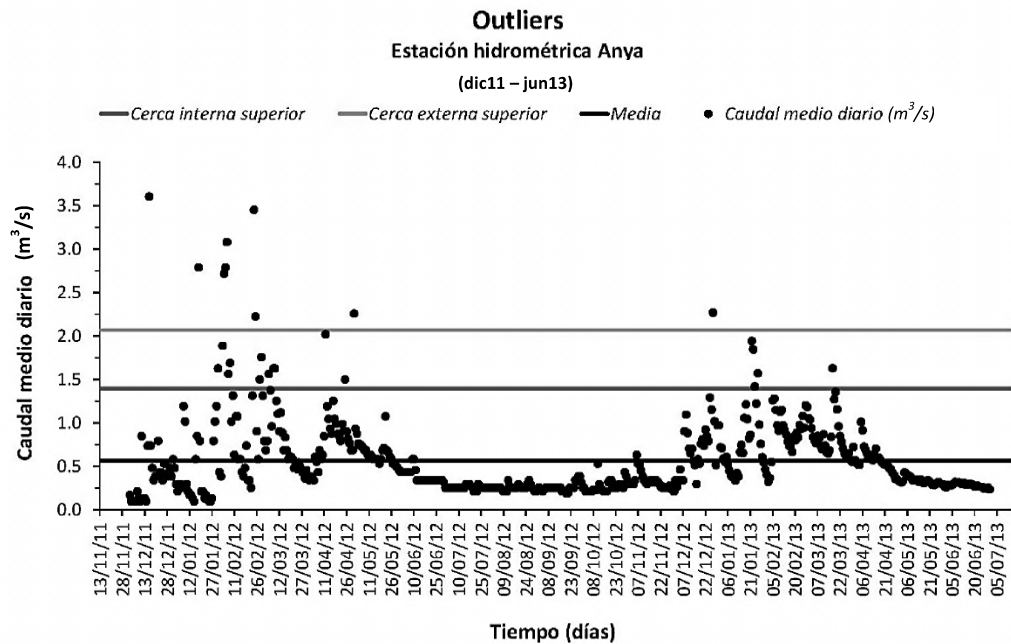
**Figura 70:** Diagrama de cajas de los caudales medios diarios (dic11 – jun13), estación hidrométrica Anya



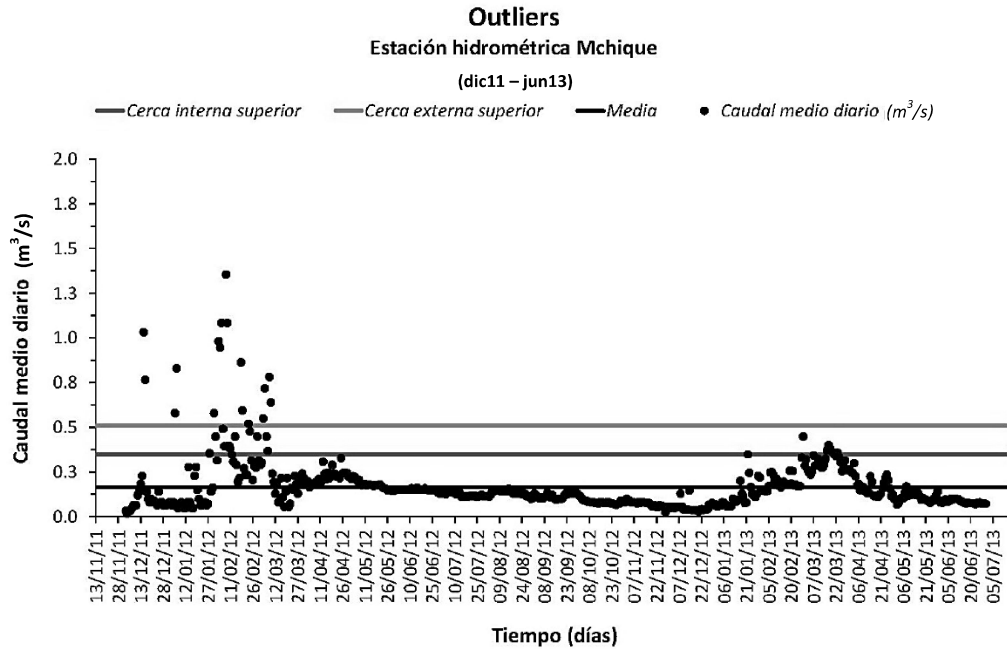


**Figura 71:** Diagrama de cajas de los caudales medios diarios (dic11 – jun13), estación hidrométrica Mchique

*Diagrama de valores atípicos de las series de caudales medios diarios observados*

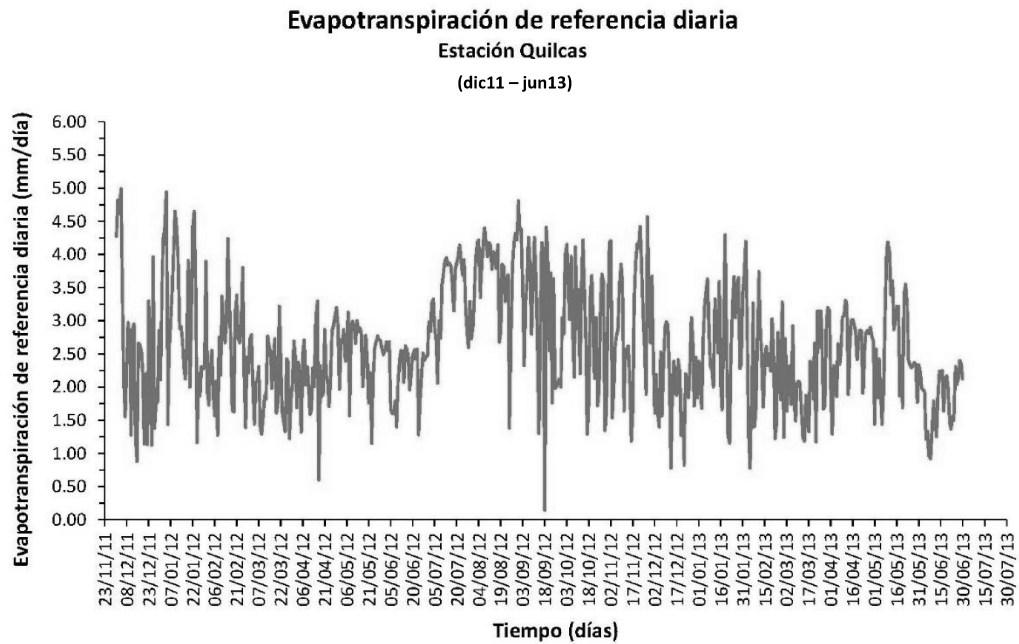


**Figura 72:** Valores atípicos de los caudales medios diarios (dic11 – jun13), estación hidrométrica Anya

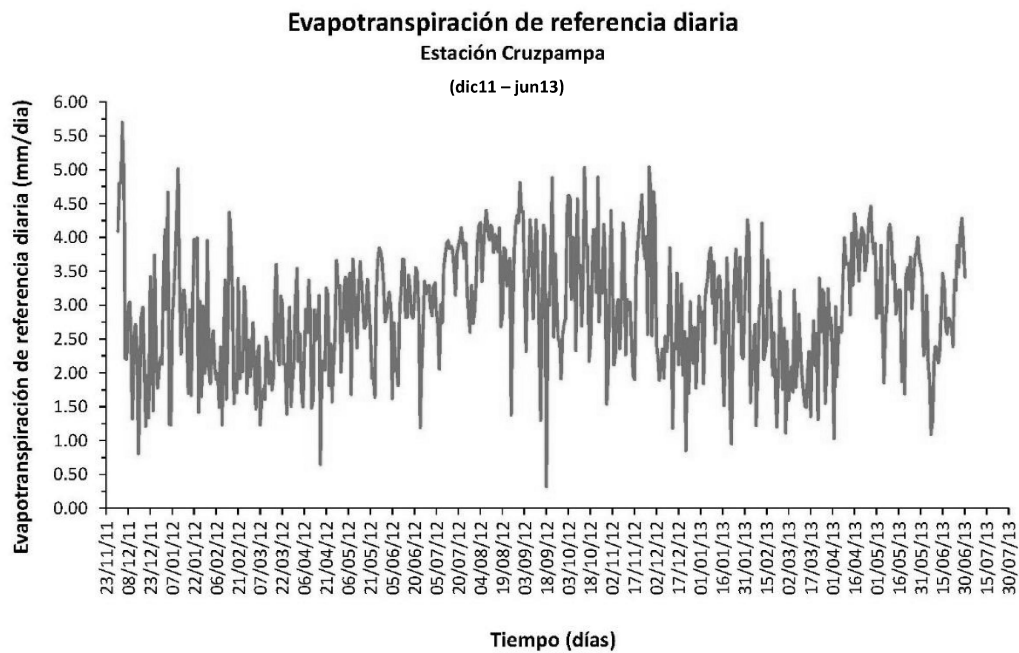


**Figura 73:** Valores atípicos de los caudales medios diarios (dic11 – jun13), estación hidrométrica Mchique

*Series de evapotranspiración de referencia diaria (mm/día)*

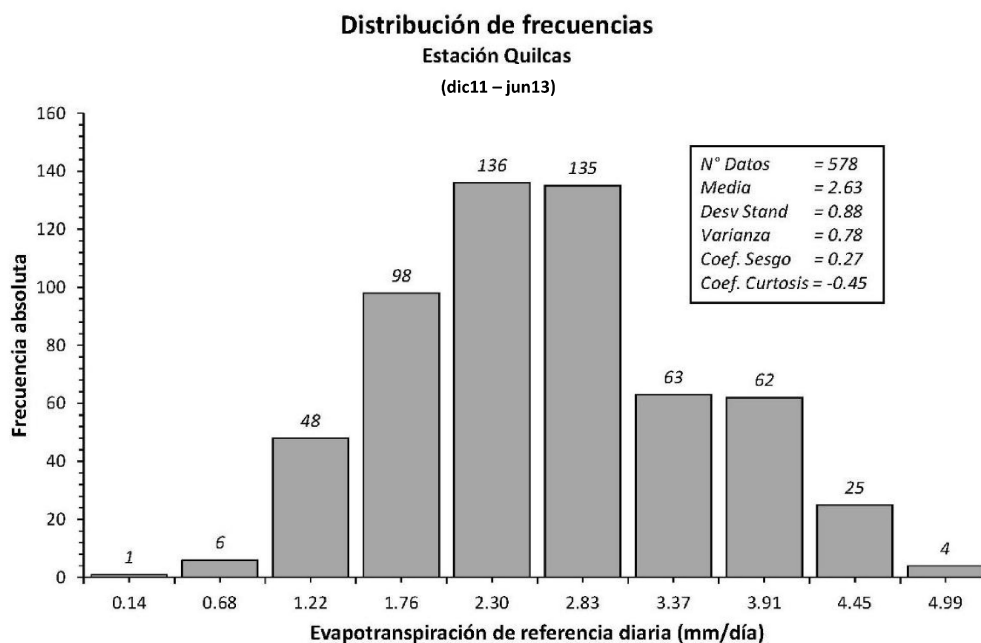


**Figura 74:** Serie de evapotranspiración de referencia diaria (dic11 – jun13), estación meteorológica Quilcas

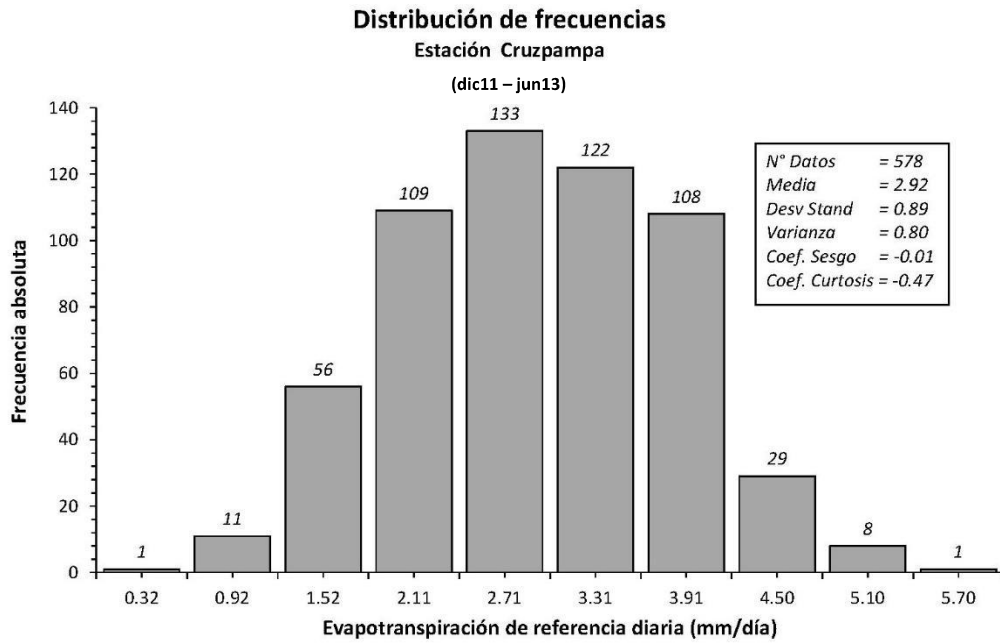


**Figura 75:** Serie de evapotranspiración de referencia diaria (dic11 – jun13), estación meteorológica Cruzpampa

*Histogramas de las series de evapotranspiración de referencia diaria (mm/día)*



**Figura 76:** Histograma de la evapotranspiración de referencia diaria (dic11 – jun13), estación meteorológica Quilcas

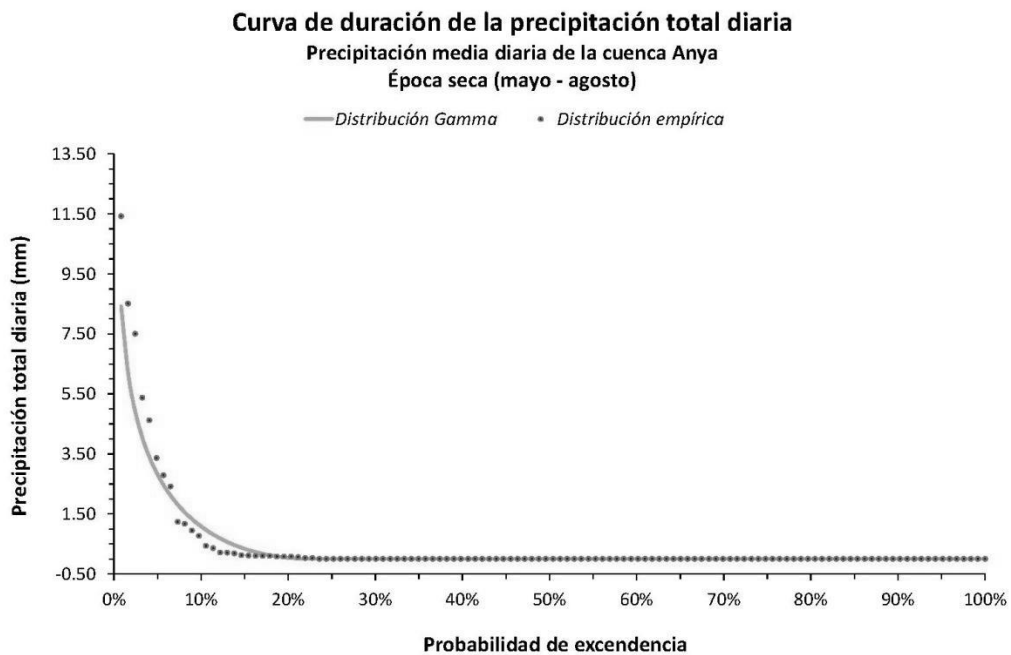


**Figura 77:** Histograma de la evapotranspiración de referencia diaria (dic11 – jun13), estación meteorológica Cruzpampa

## Anexo 1.2: Hidrometeorología

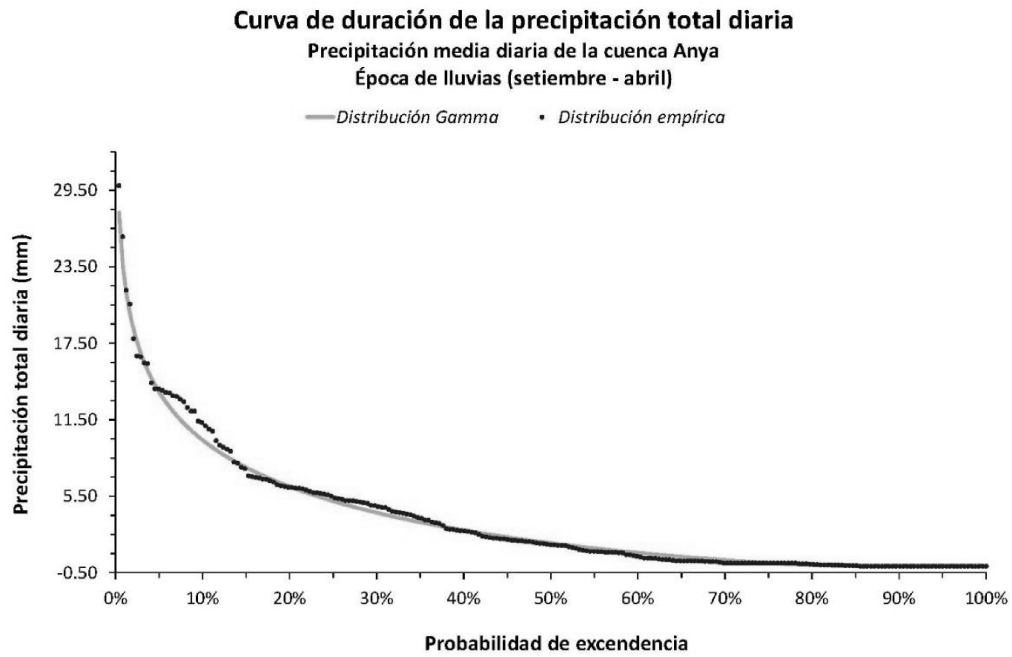
### a. Pluviometría

#### *Persistencia de la precipitación total diaria (mm) en época seca y época de lluvias*

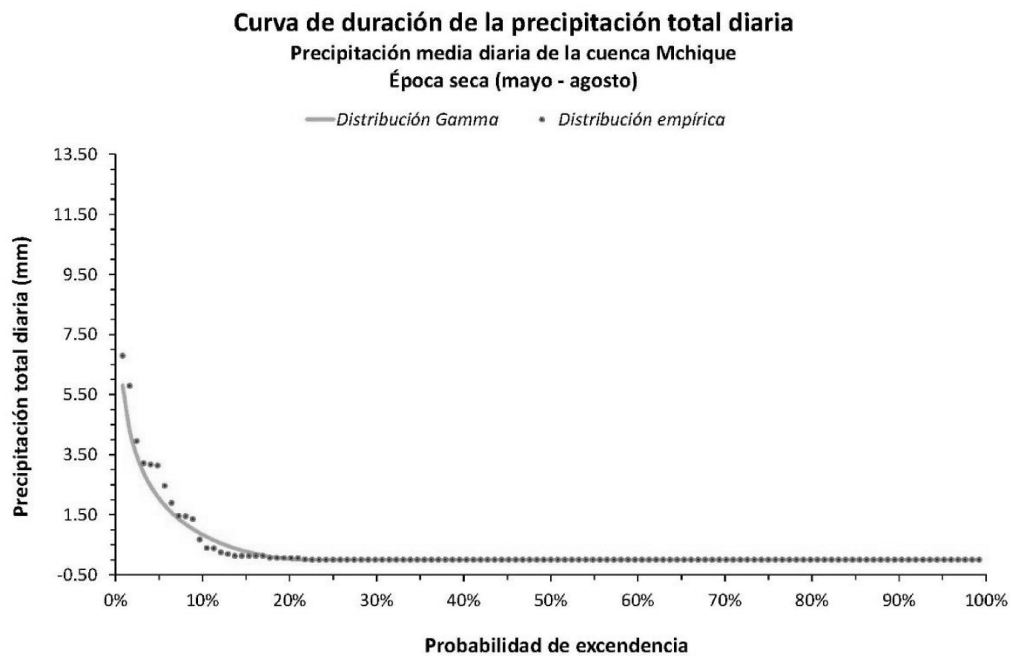


**Figura 78:** Curva de duración de la precipitación total diaria en época seca (mayo-agosto), cuenca

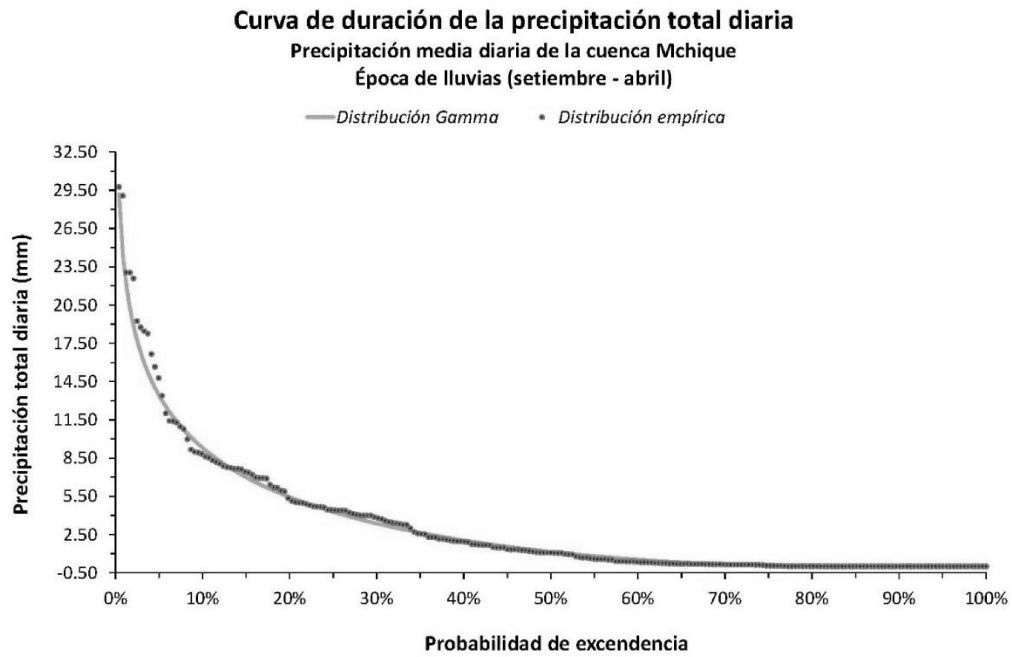
Anya



**Figura 79:** Curva de duración de la precipitación total diaria en época de lluvias (septiembre - abril), cuenca Anya

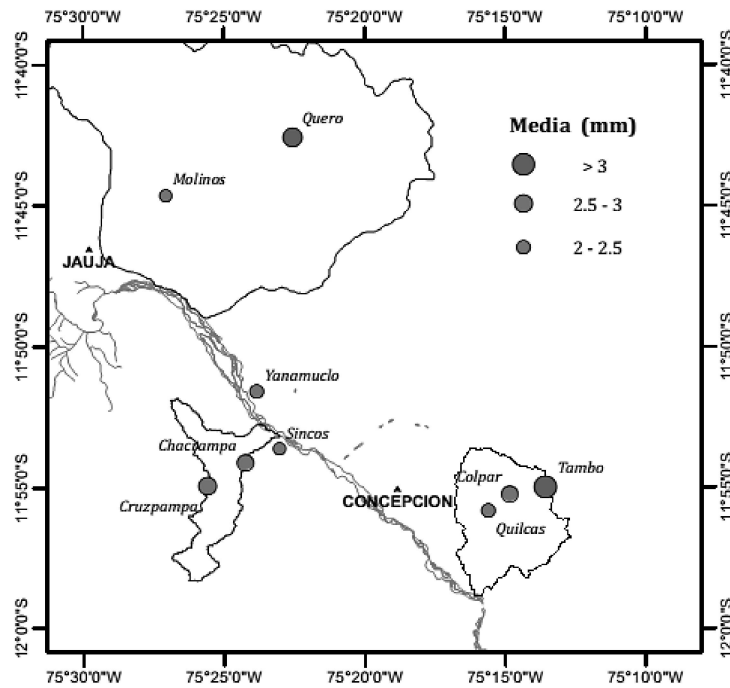


**Figura 80:** Curva de duración de la precipitación total diaria en época seca (mayo - agosto), cuenca Mchique



**Figura 81:** Curva de duración de la precipitación total diaria en época de lluvias (septiembre - abril), cuenca Mchique

*Variación espacial de la media (mm) y varianza (mm<sup>2</sup>) de la precipitación total diaria del 2012*



**Figura 82:** Variación espacial de la media de la precipitación total diaria del 2012

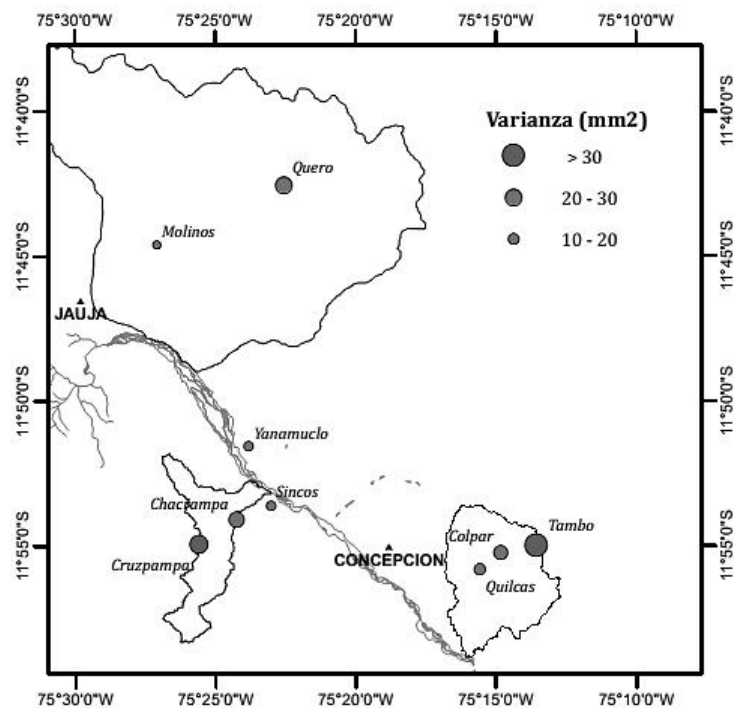


Figura 83: Variación espacial de la varianza de la precipitación total diaria del 2012

*Análisis de componentes principales de la precipitación total diaria (mm) del 2012*

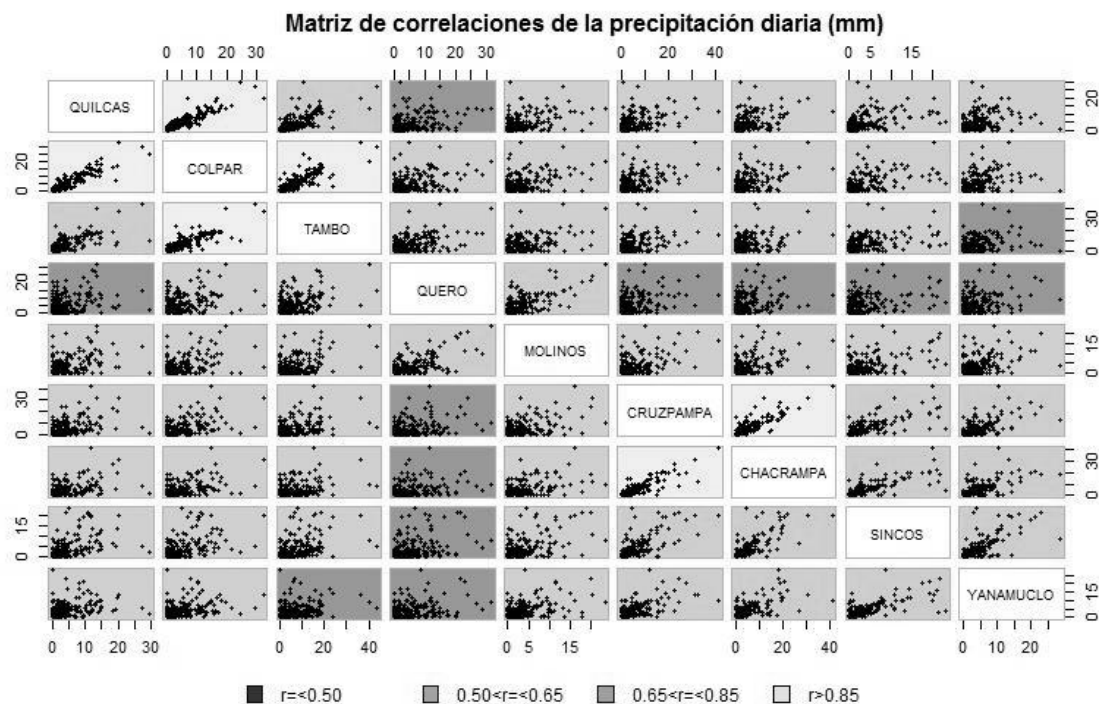
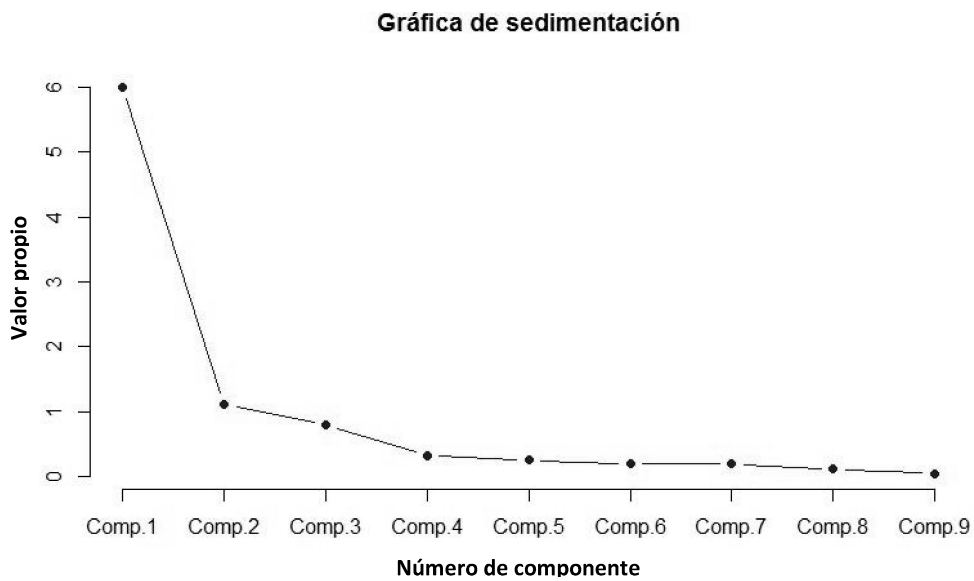
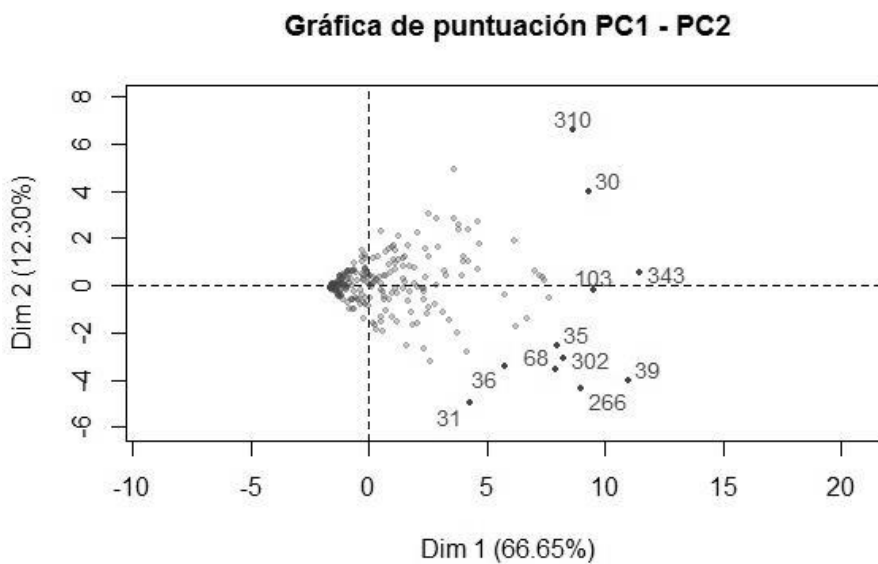


Figura 84: Matriz de correlaciones de la precipitación total diaria del 2012



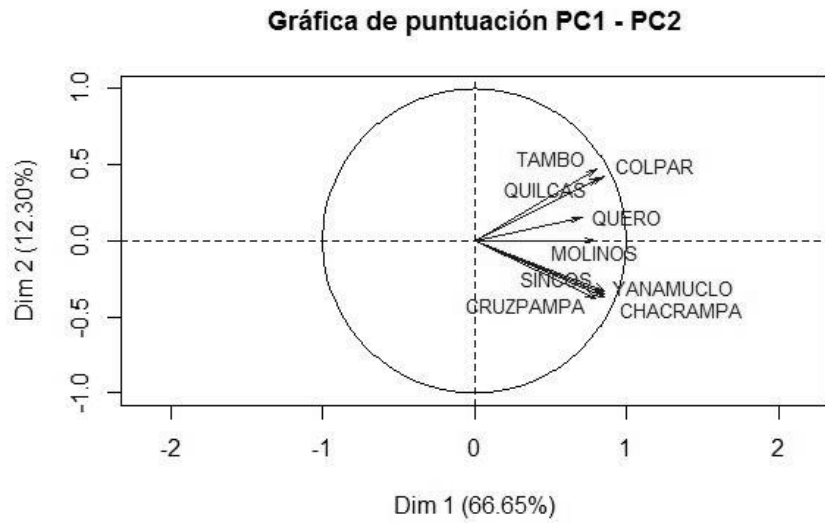
**Figura 85:** Gráfica de sedimentación de los componentes principales de la precipitación total diaria del 2012



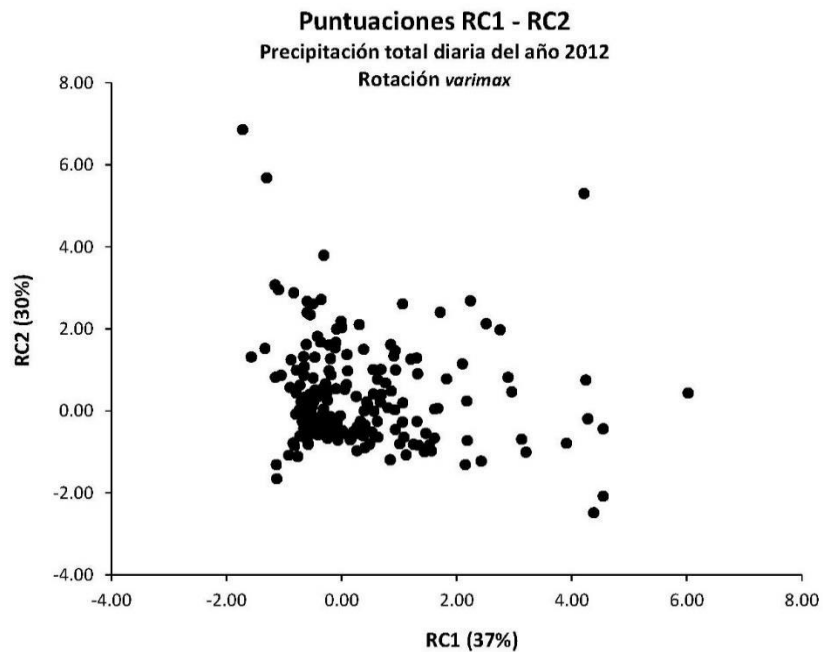
• = Día del año 2012 (1 : 01enero2012 ; 366 : 31diciembre2012 días)

**Figura 86:** Gráfica de puntuación de los días del primer y segundo componente principal de la precipitación total diaria del 2012



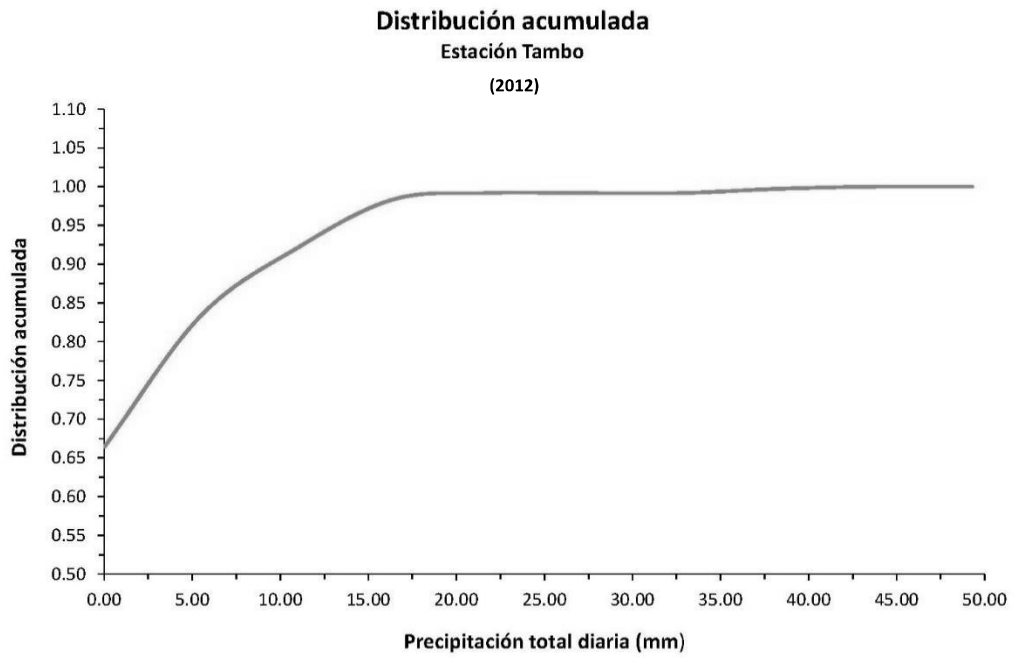


**Figura 87:** Grafica de puntuación de las estaciones del primer y segundo componente principal de la precipitación total diaria del 2012

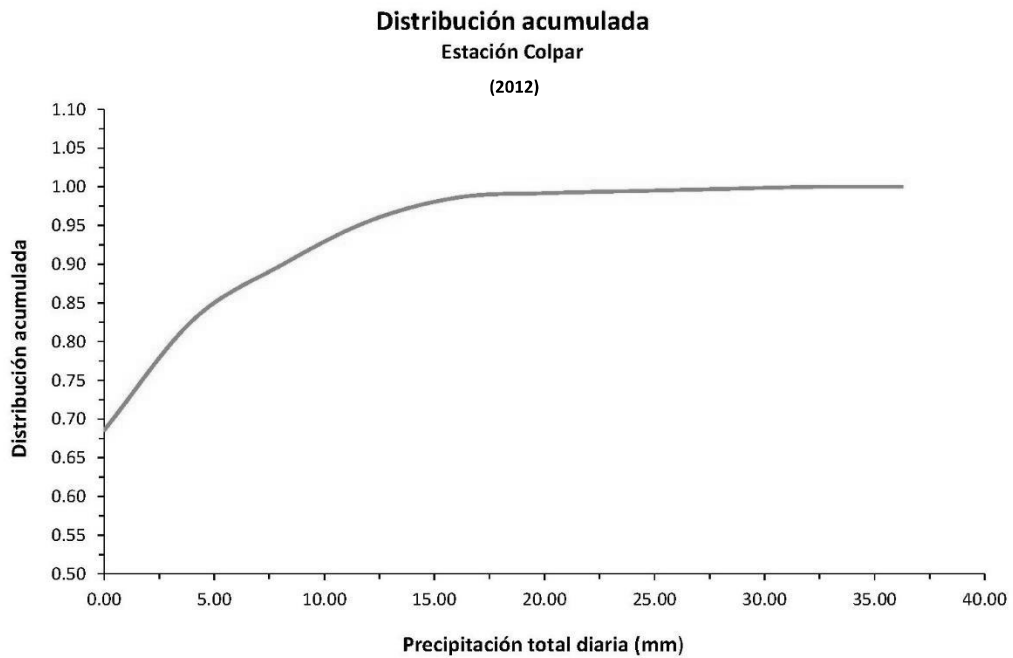


**Figura 88:** Grafica de puntuación de los días de precipitación del primer y segundo componente rotado de la precipitación total diaria del 2012

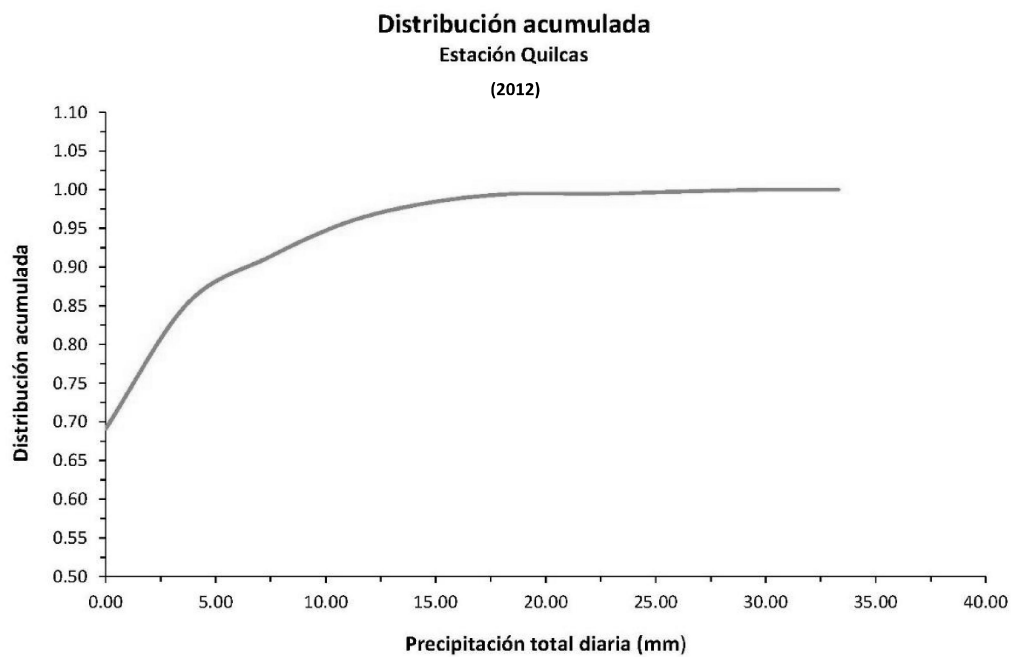
*Distribución acumulada de la precipitación total diaria (mm) del 2012*



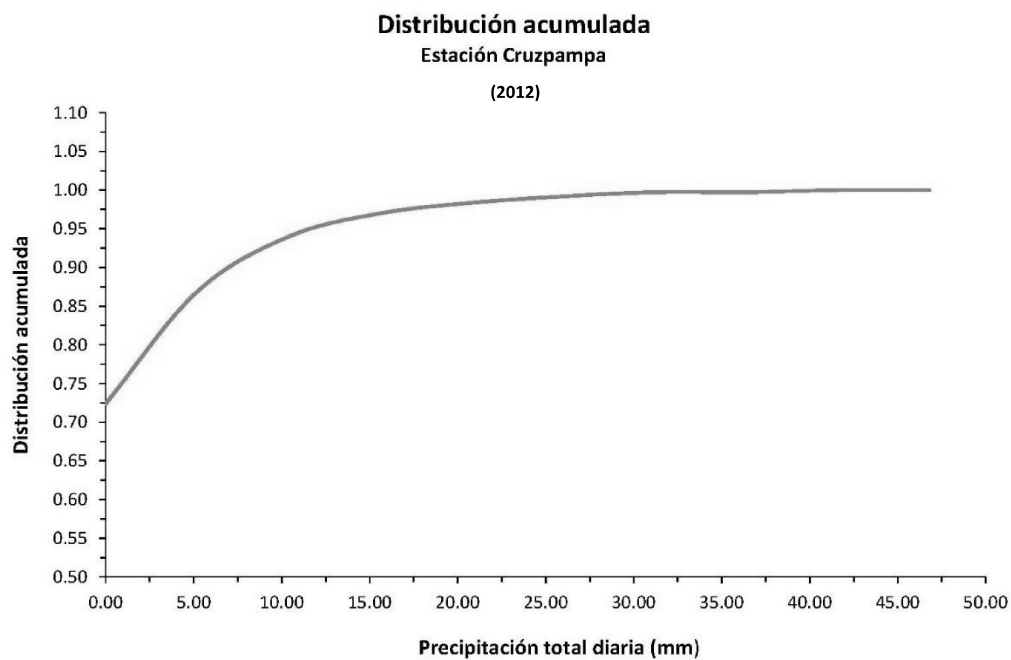
**Figura 89:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Tambo



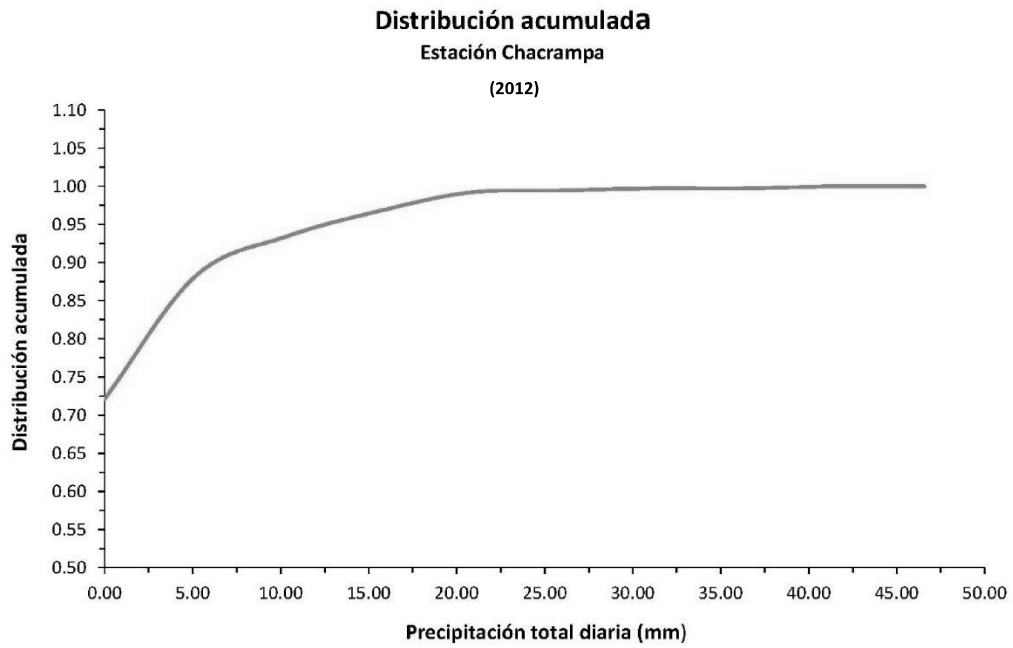
**Figura 90:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Colpar



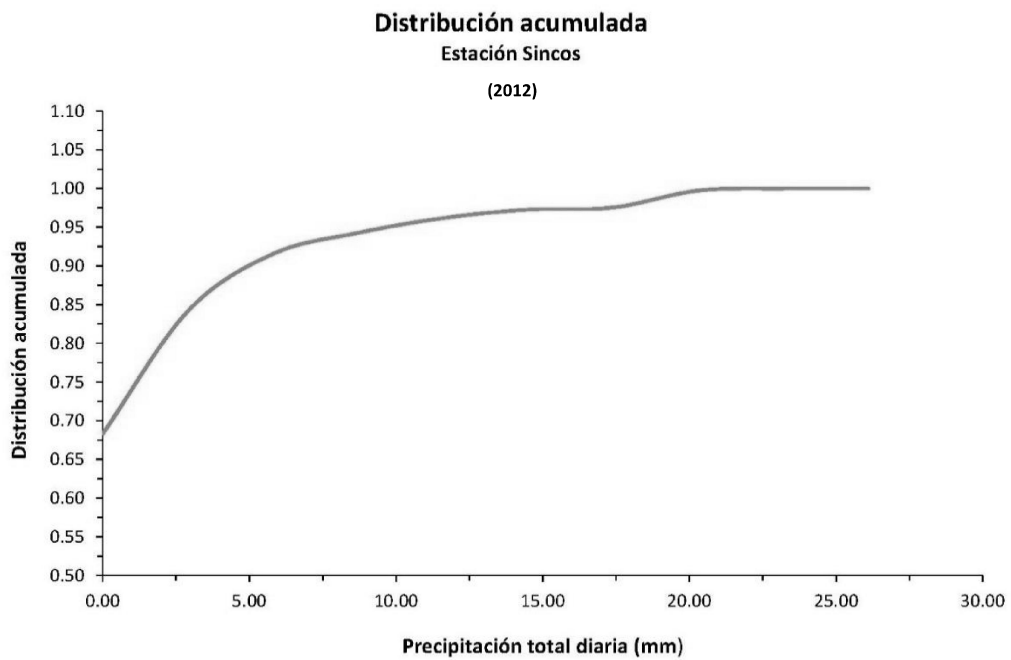
**Figura 91:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Quilcas



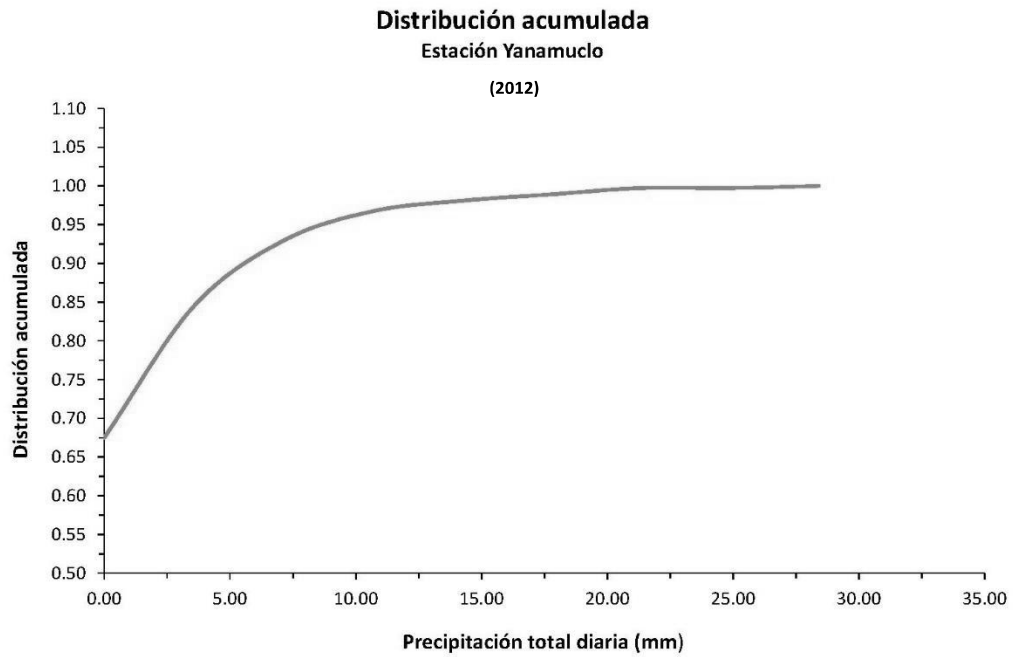
**Figura 92:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Cruzpampa



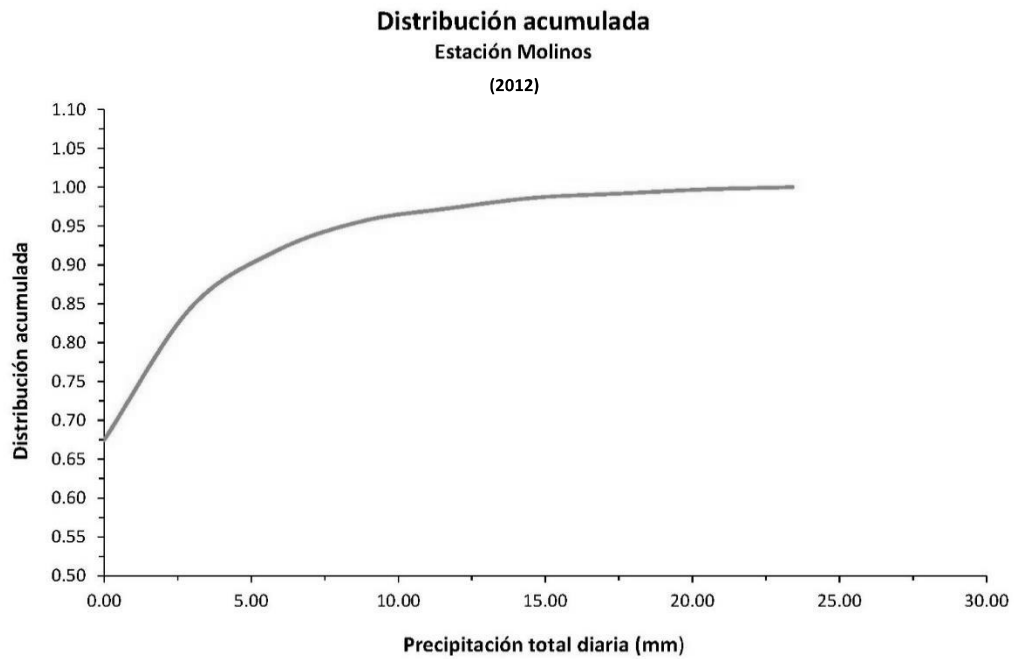
**Figura 93:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Chacrampa



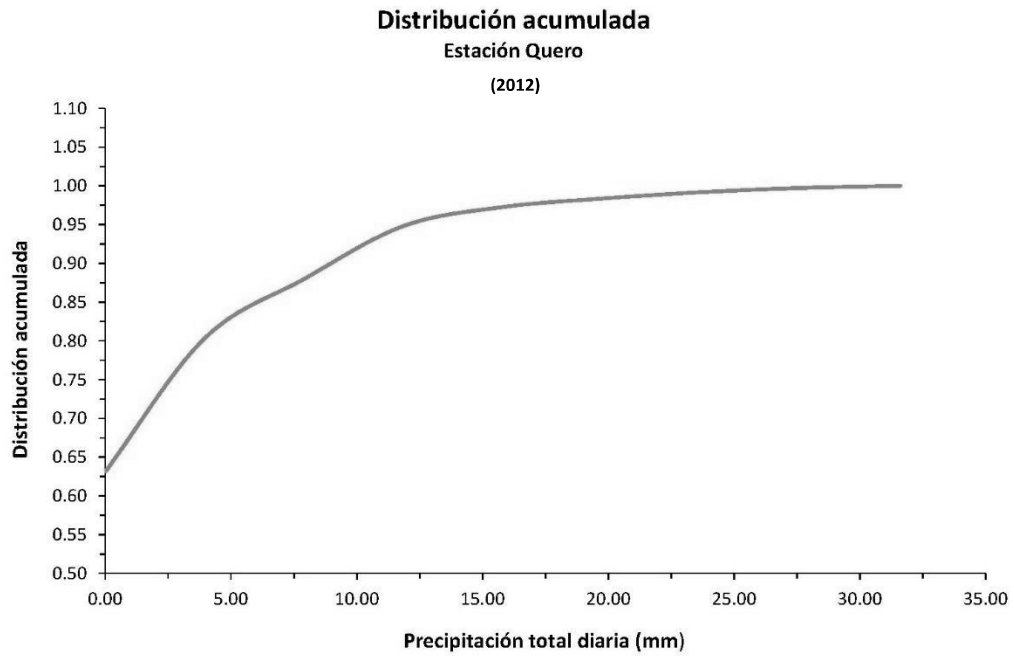
**Figura 94:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Sincos



**Figura 95:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Yanamuco



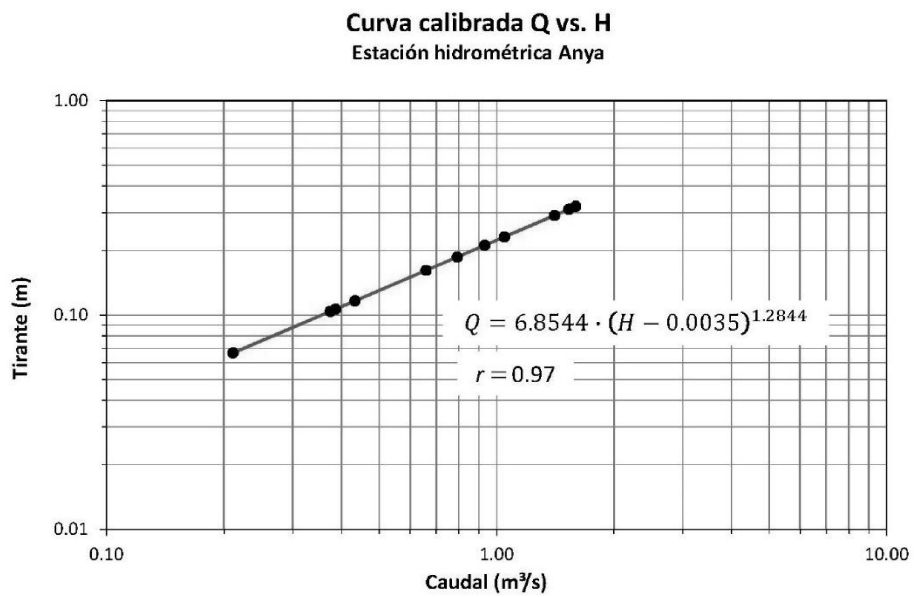
**Figura 96:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Molinos



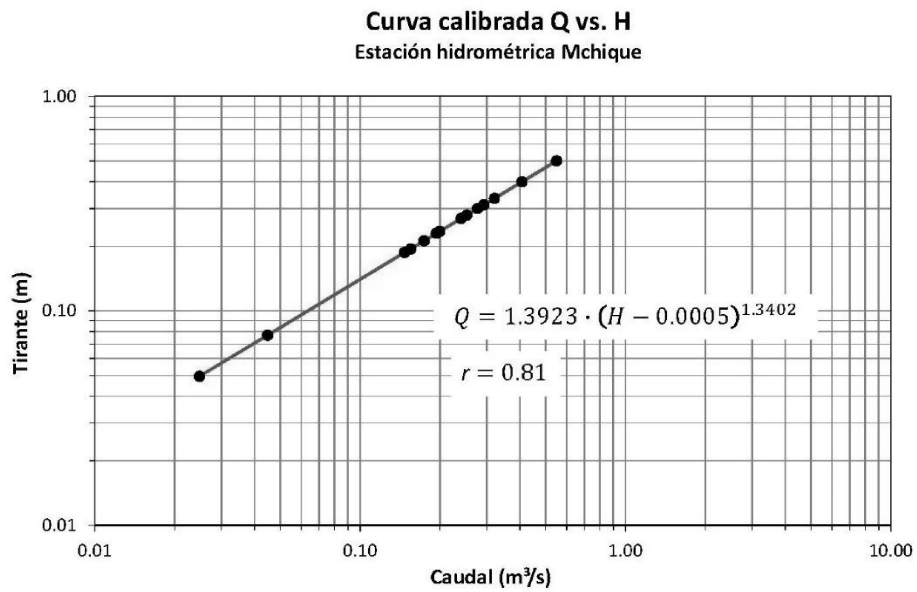
**Figura 97:** Curva de distribución acumulada de la precipitación total diaria del 2012, estación Quero

**b. Hidrometría**

*Curvas de calibración de las estaciones hidrométricas Anya y Mchique (diciembre 2011 – junio 2013)*

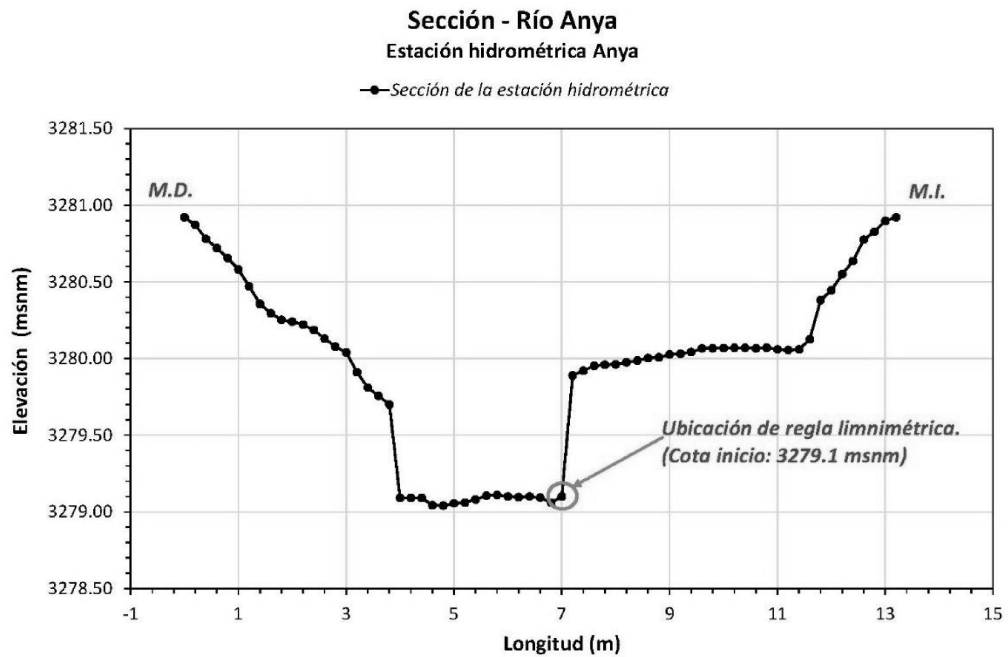


**Figura 98:** Curva de calibración de la estación hidrométrica Anya, periodo dic11 – jun13

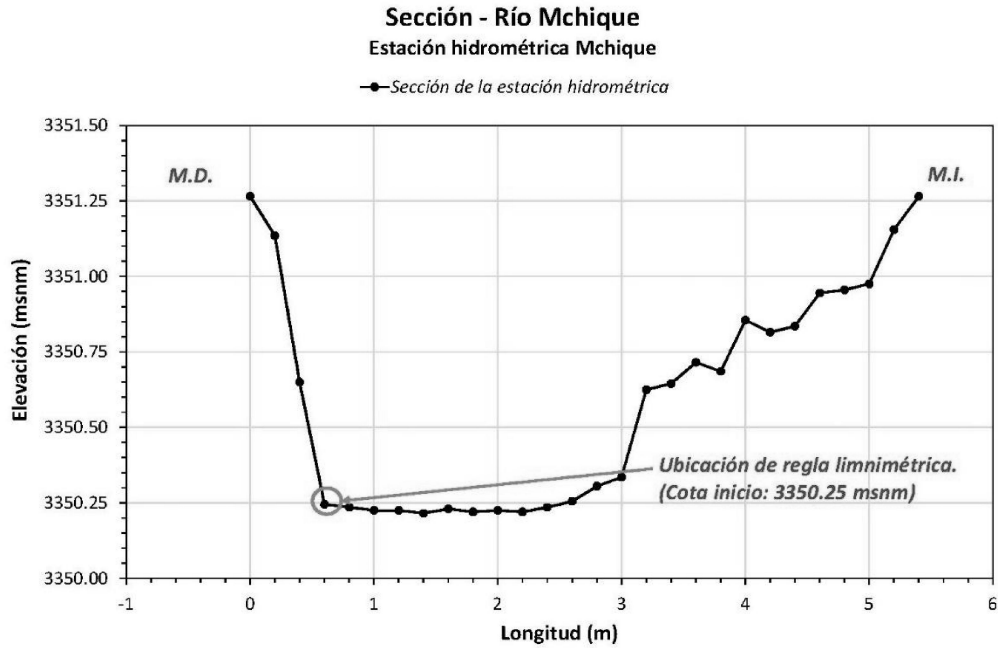


**Figura 99:** Curva de calibración de la estación hidrométrica Mchique, periodo dic11 – jun13

*Secciones transversales de las estaciones hidrométricas Anya y Mchique*

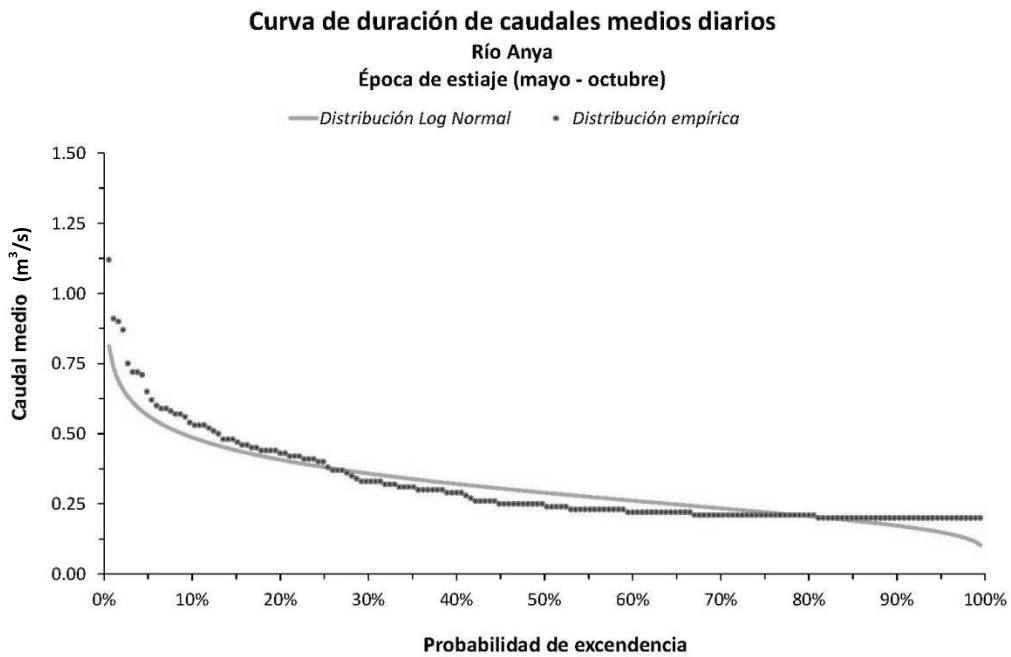


**Figura 100:** Sección típica del río Anya, estación hidrométrica Anya



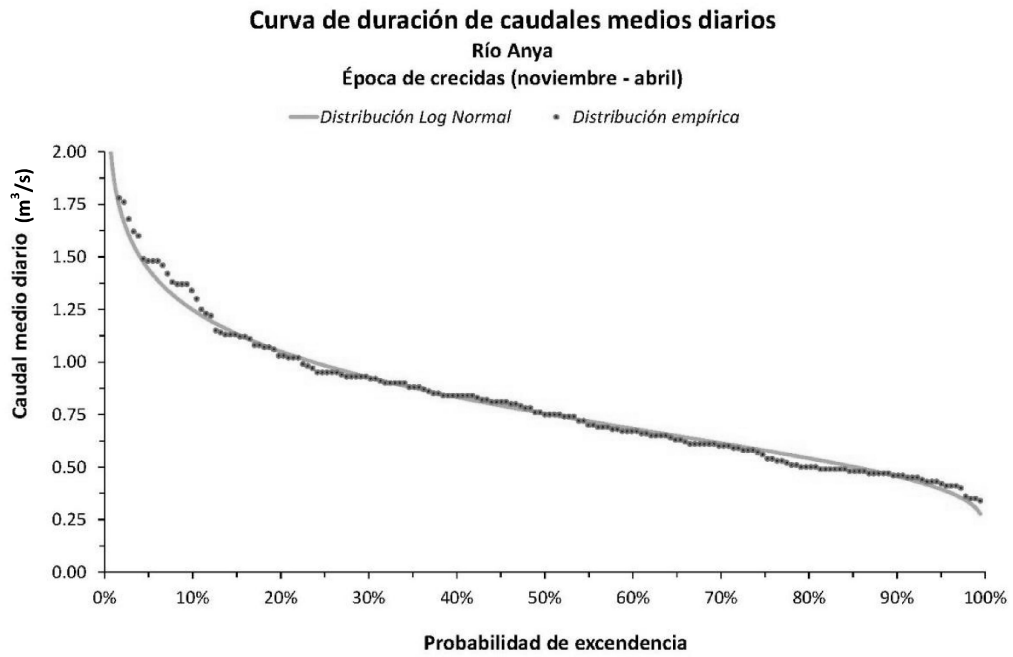
**Figura 101:** Sección típica del río Mchique, estación hidrométrica Mchique

*Persistencia de caudales medios diarios de los ríos Anya y Mchique*

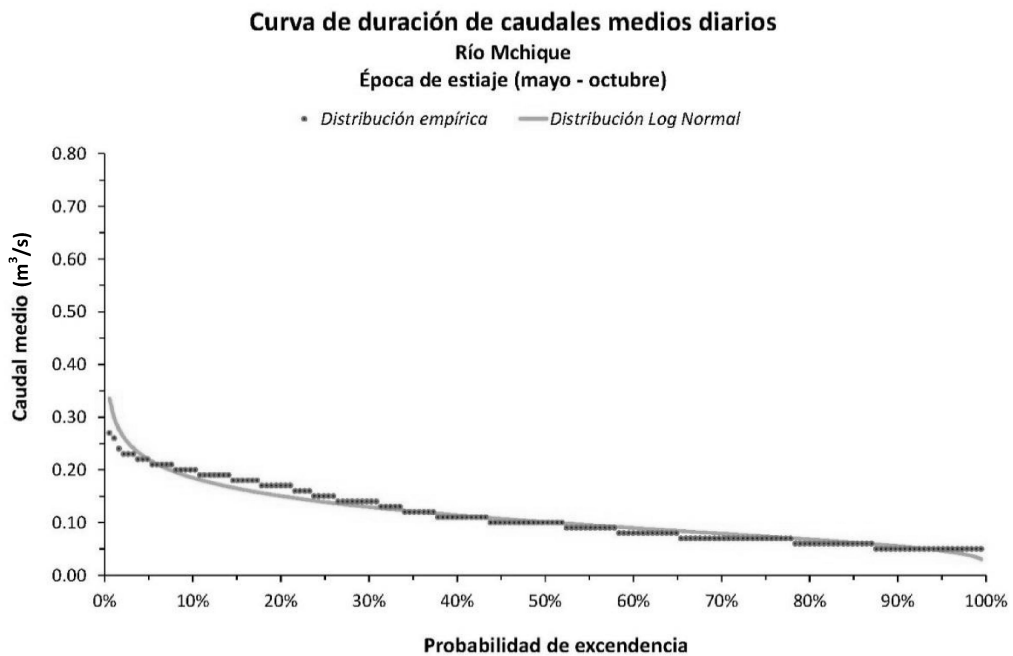


**Figura 102:** Curva de duración de caudales medios diarios del río Anya, periodo de estiaje (mayo - octubre)

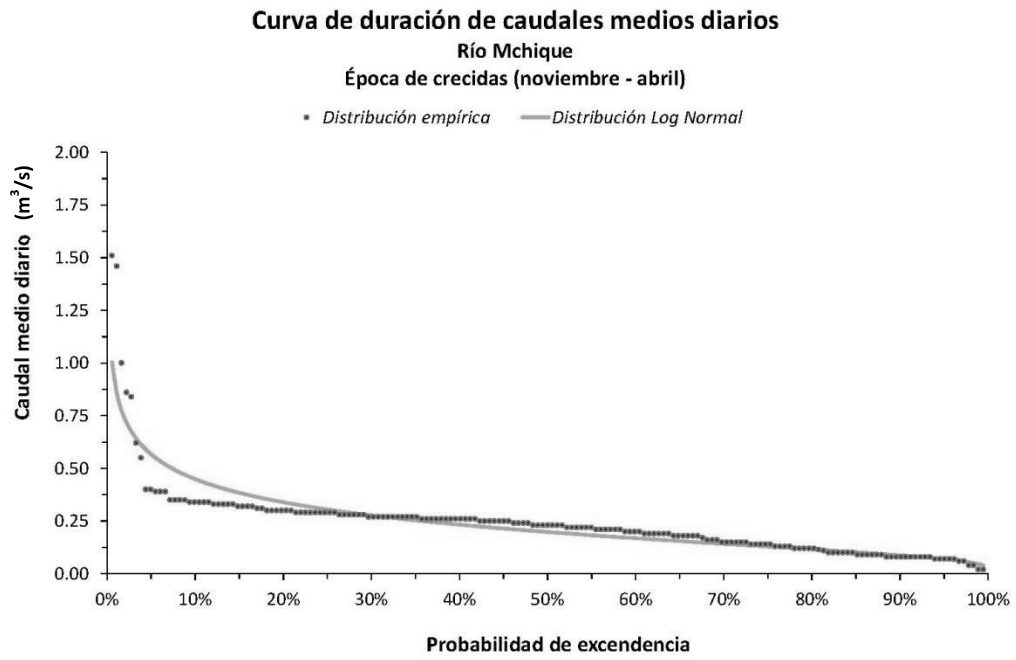




**Figura 103:** Curva de duración de caudales medios diarios del río Anya, periodo de crecidas (noviembre - abril)



**Figura 104:** Curva de duración de caudales medios diarios del río Mchique, periodo de estiaje (mayo - octubre)

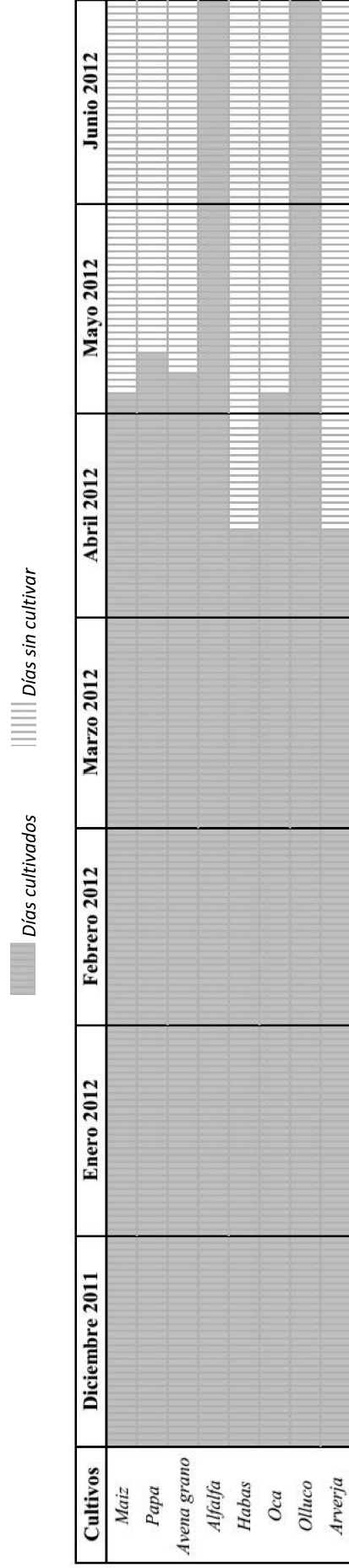


**Figura 105:** Curva de duración de caudales medios diarios del río Mchique, periodo de crecidas (noviembre - abril)

**Anexo 2: De la determinación del balance hídrico**

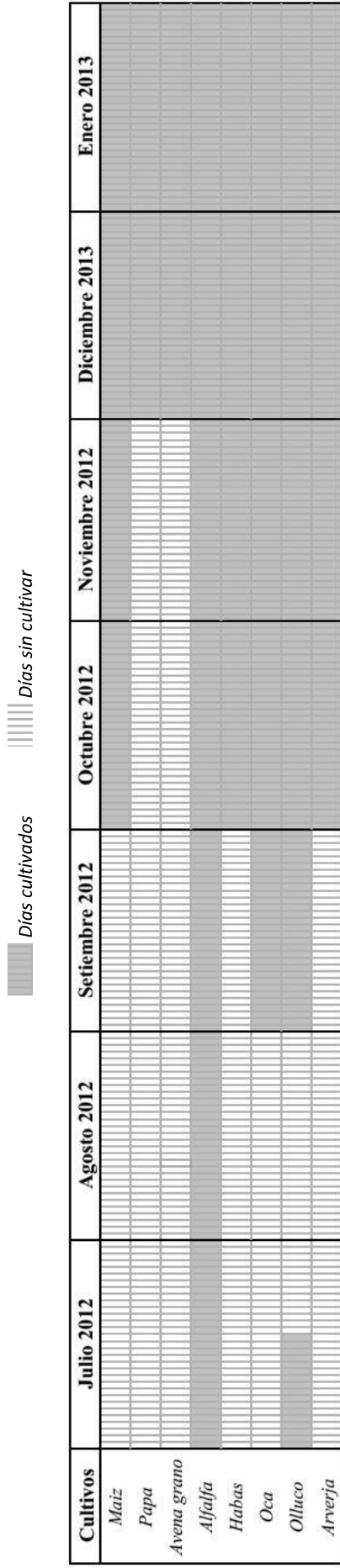
**Anexo 2. 1: Demanda hídrica de las cuencas Anya y Mchique**

**Cédula de cultivo de la cuenca Anya**



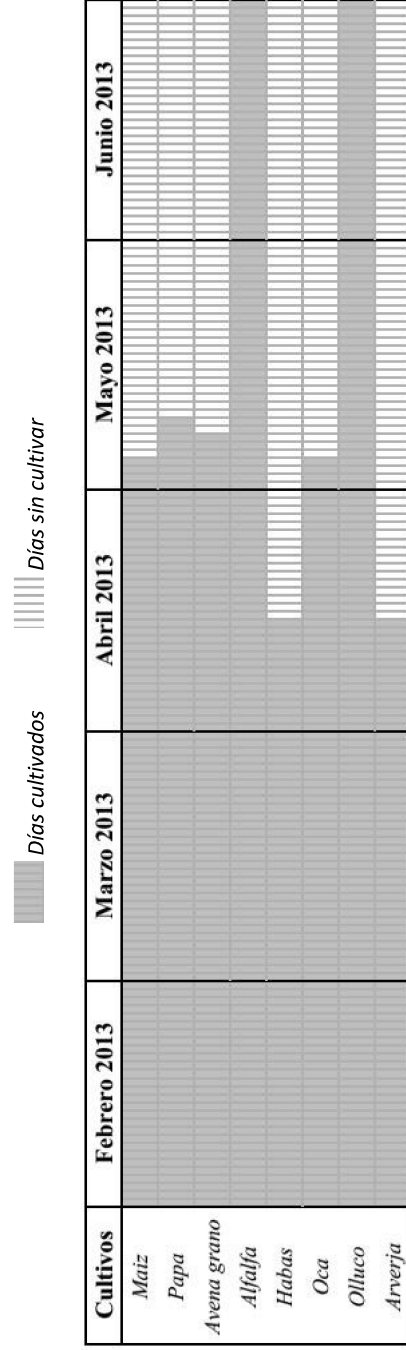
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 106:** Cédula de cultivos bajo riego de la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13



FUENTE: Elaboración propia

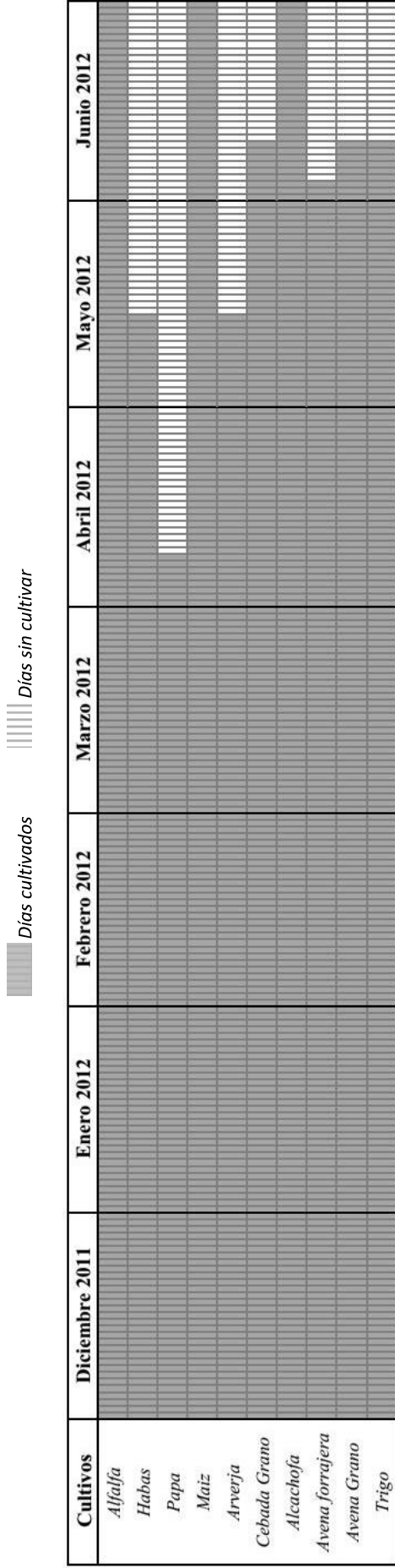
**Figura 106:** Cédula de cultivos bajo riego de la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13 (continuación)



FUENTE: Elaboración propia

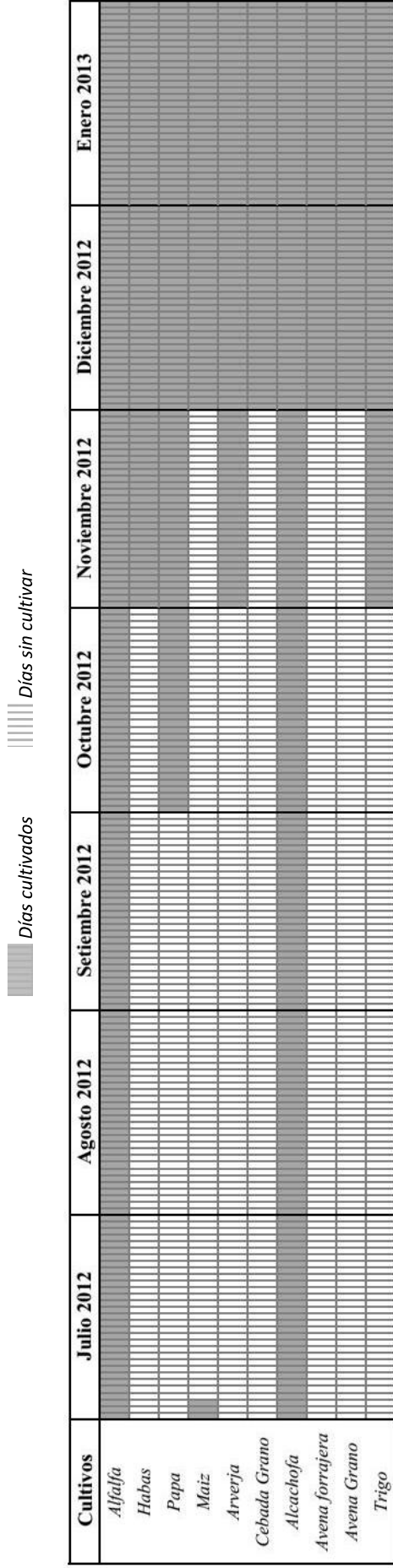
**Figura 106:** Cédula de cultivos bajo riego de la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13 (continuación)

***Cédula de cultivo de la cuenca Mchique***



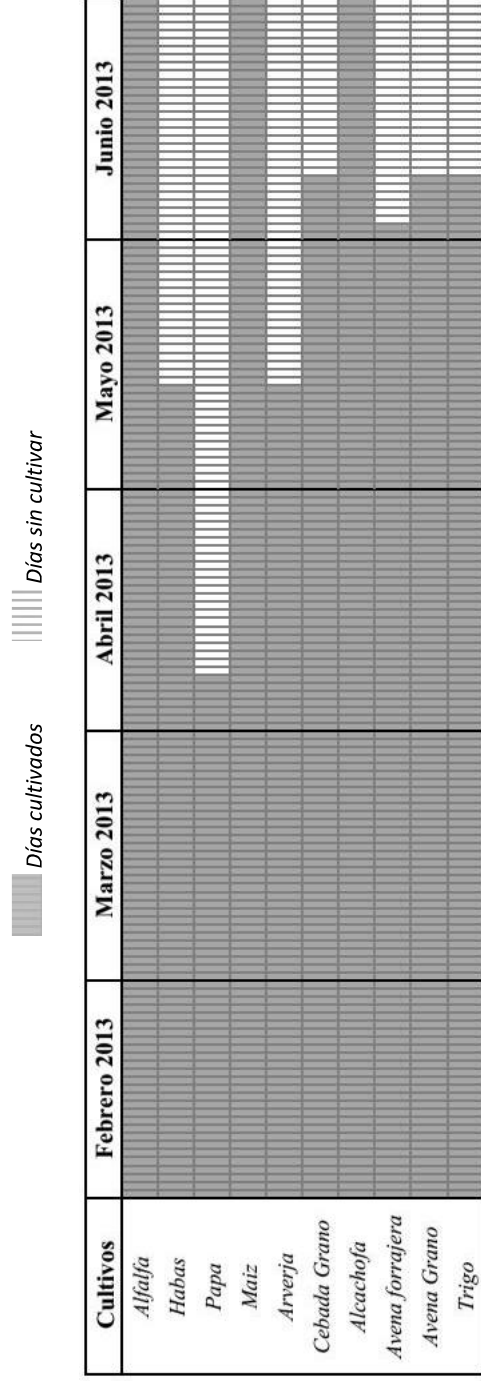
FUENTE: Elaboración propia

**Figura 107:** Cédula de cultivos bajo riego de la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13



FUENTE: Elaboración propia

**Figura 107:** Cédula de cultivos bajo riego de la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13 (continuación)

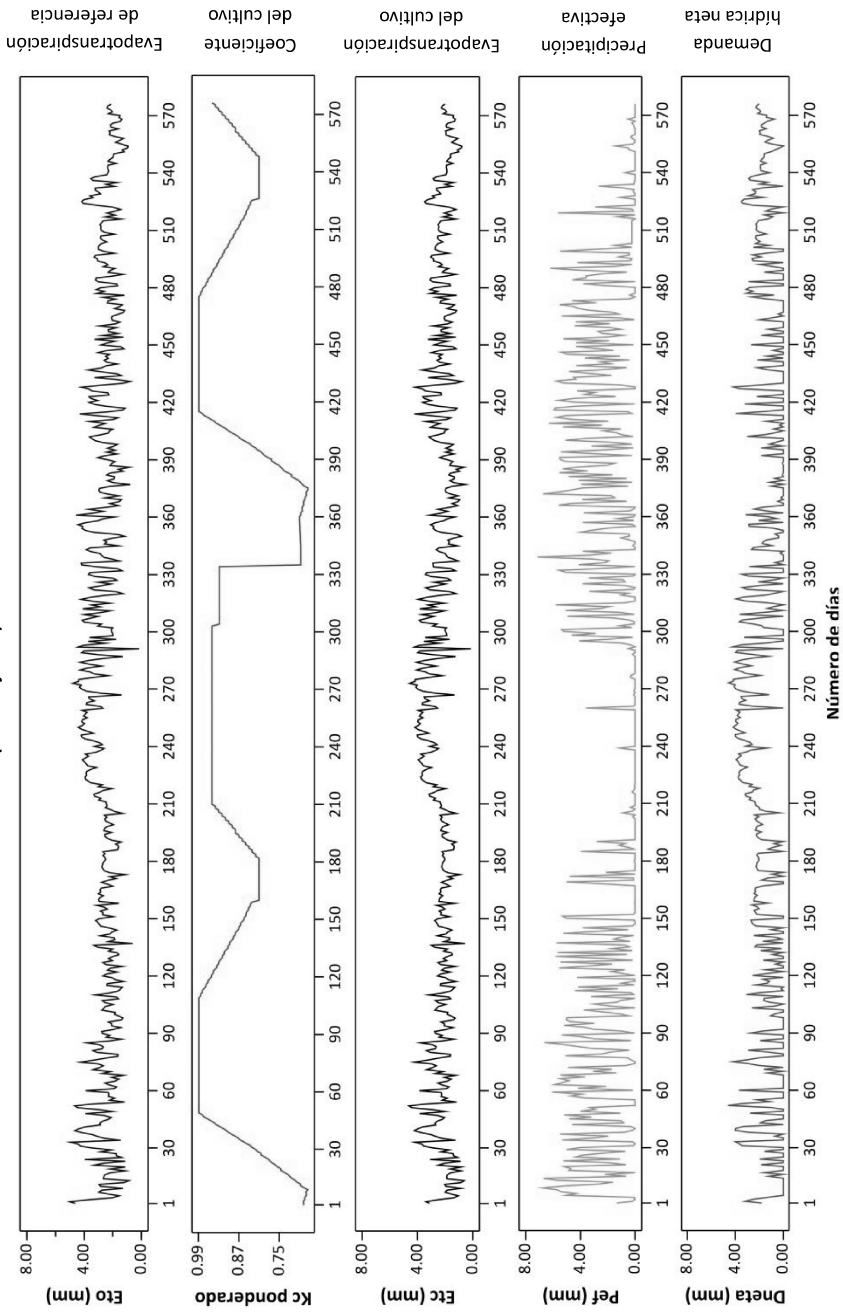


FUENTE: Elaboración propia

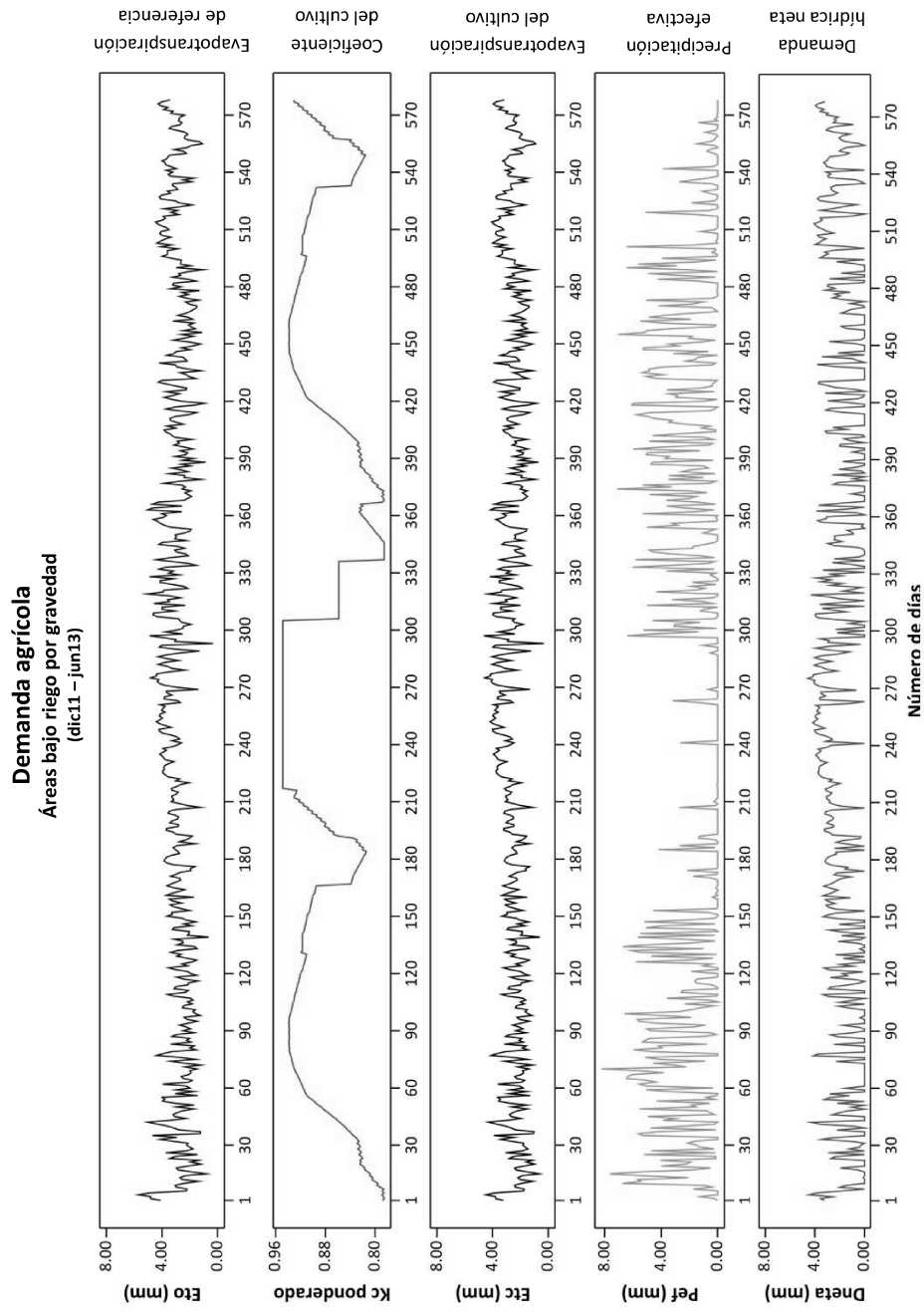
**Figura 107:** Cédula de cultivos bajo riego de la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13 (continuación)

### *Demanda agrícola neta de las áreas bajo en las cuencas Anya y Mchique*

**Demanda agrícola**  
**Áreas bajo riego por gravedad**  
**(dic11 – jun13)**



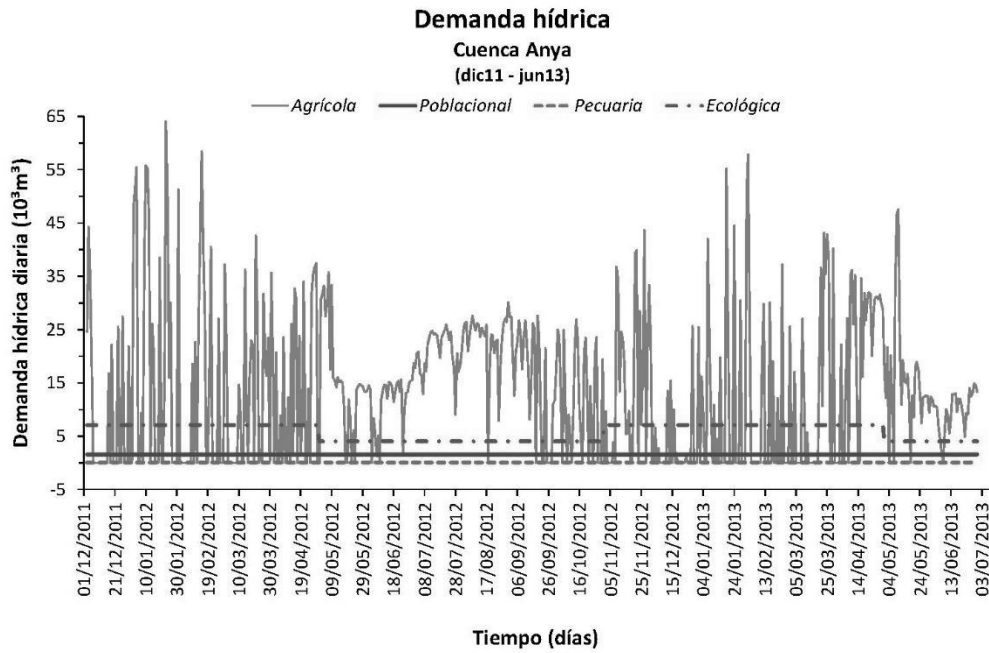
**Figura 108:** Series temporales de evapotranspiración de referencia, coeficiente del cultivo, evapotranspiración del cultivo, precipitación efectiva y demanda hídrica neta de áreas bajo riego en la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13



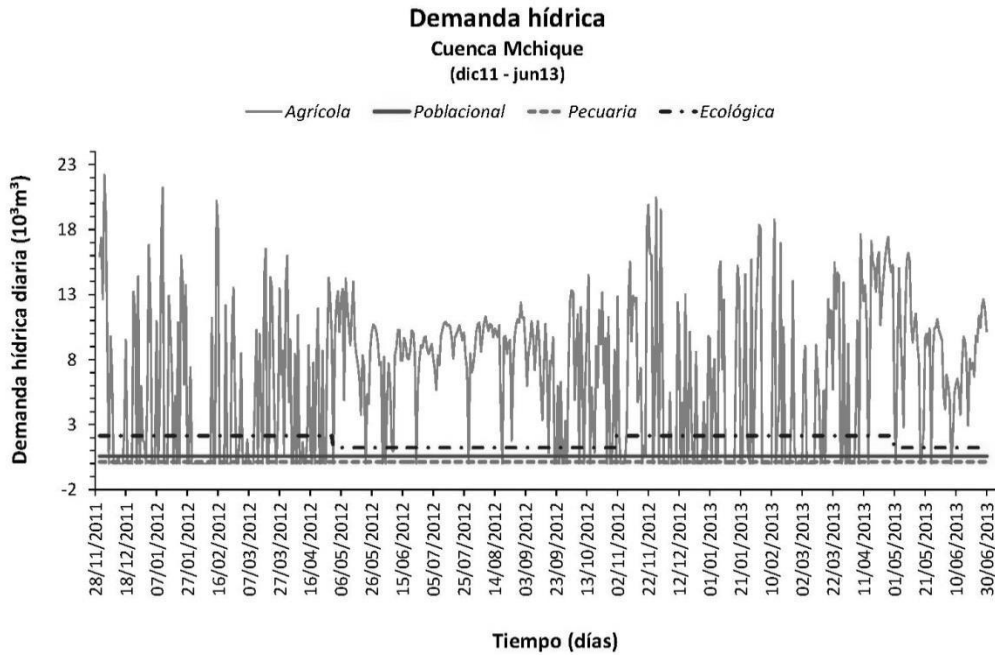
**Figura 109:** Series temporales de evapotranspiración de referencia, coeficiente del cultivo, evapotranspiración del cultivo, precipitación efectiva y demanda hídrica neta de áreas bajo riego en la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13



***Demanda hídrica actual de las cuencas Anya y Mchique (diciembre 2011 – junio 2013)***

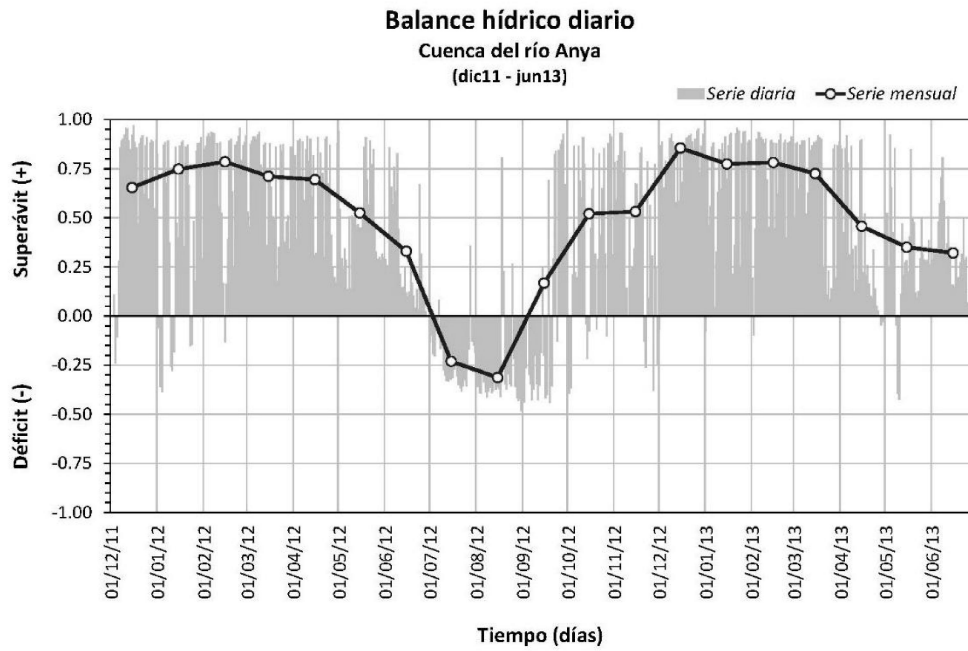


**Figura 110:** Demanda hídrica actual de la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13

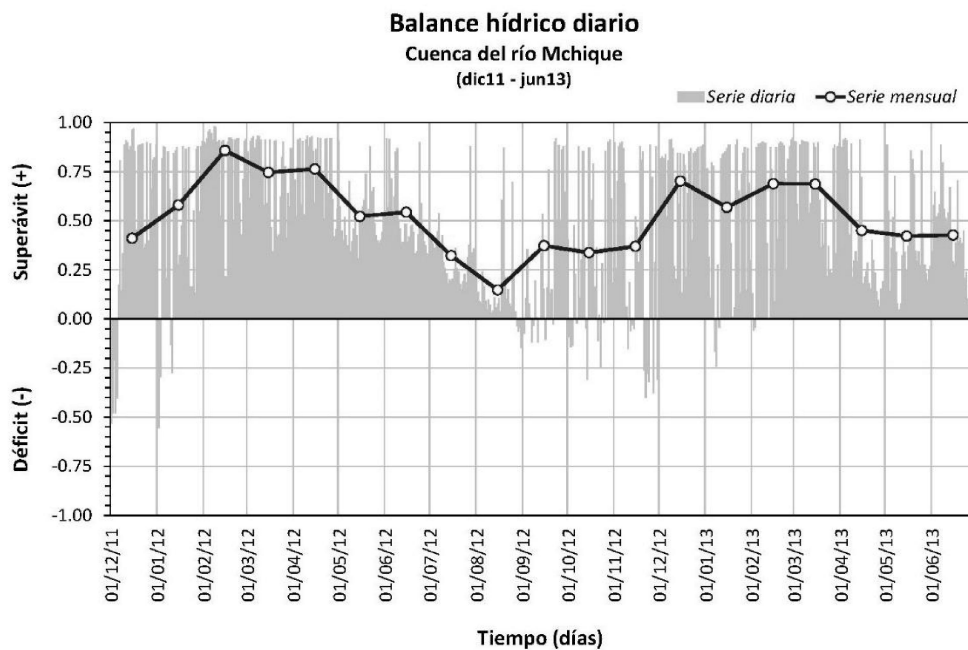


**Figura 111:** Demanda hídrica actual de la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13

**Anexo 2.2: Balance hídrico de las cuencas Anya y Mchique (diciembre 2011 – junio 2013)**



**Figura 112:** Balance hídrico actual de la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13



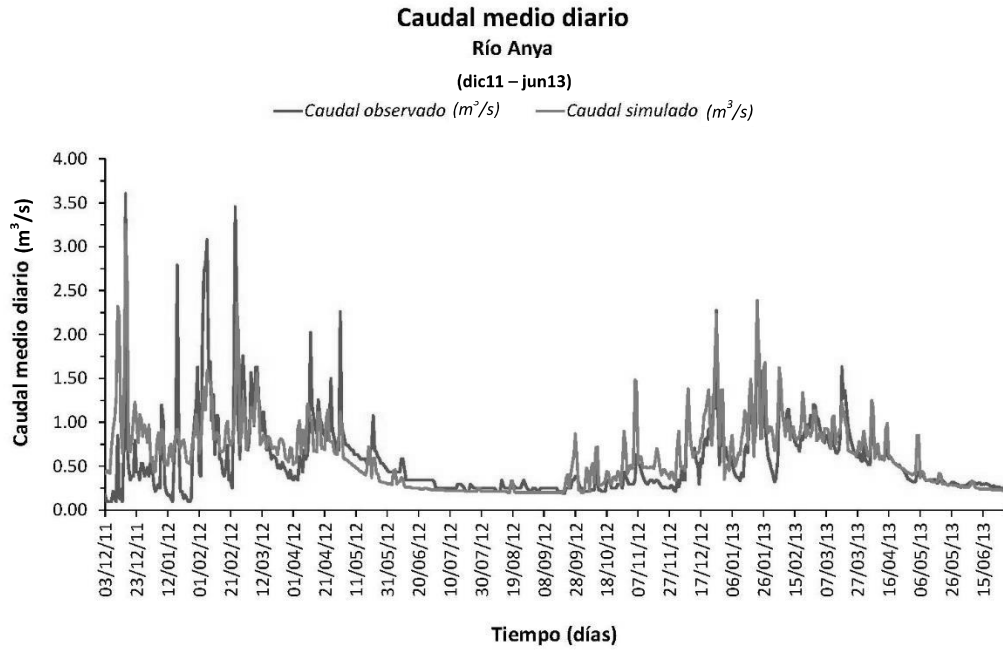
**Figura 113:** Balance hídrico actual de la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13

**Anexo 3: De la simulación del comportamiento hidrológico de las cuencas**

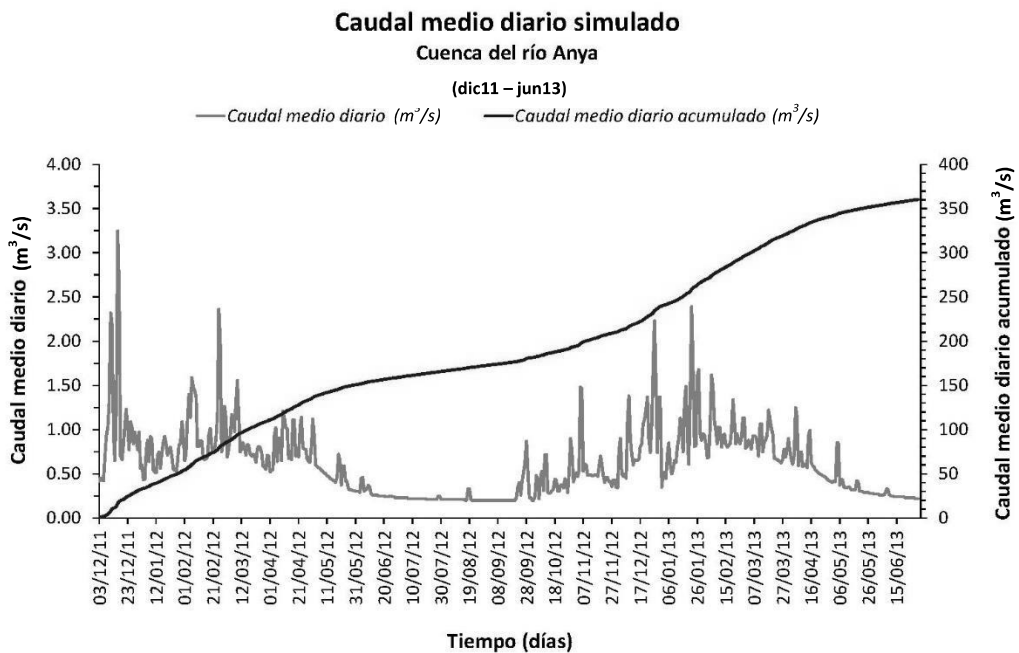
**Anexo 3.1: Del modelo hidrológico**

**a. Modelo hidrológico de la cuenca Anya**

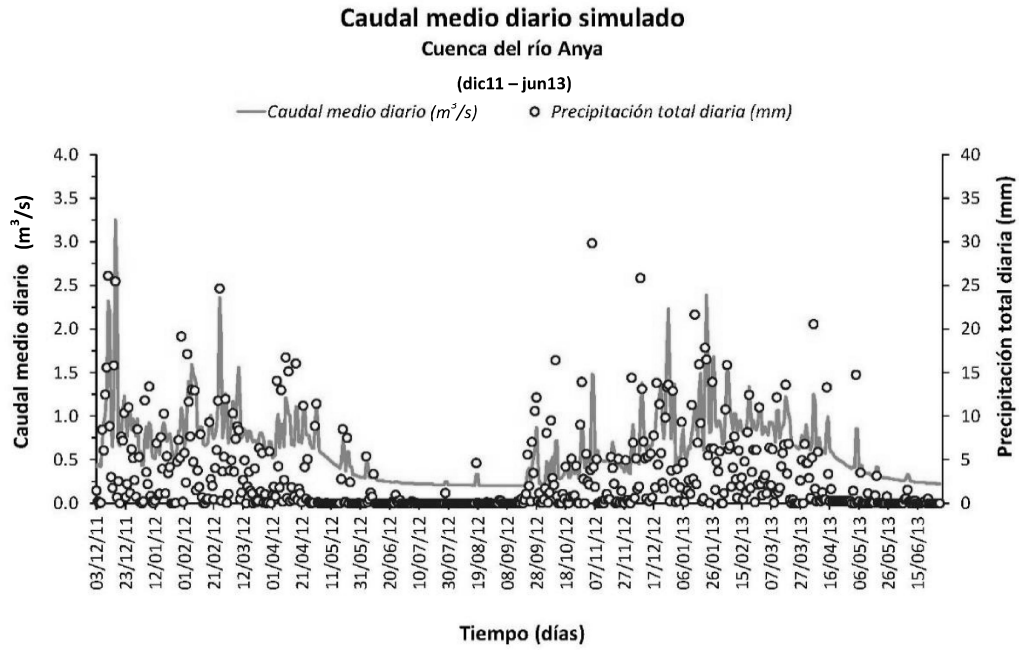
***Caudales observados y simulados en la cuenca Anya***



**Figura 114:** Caudales medios diarios observados y simulados del río Anya, periodo dic11 – jun13

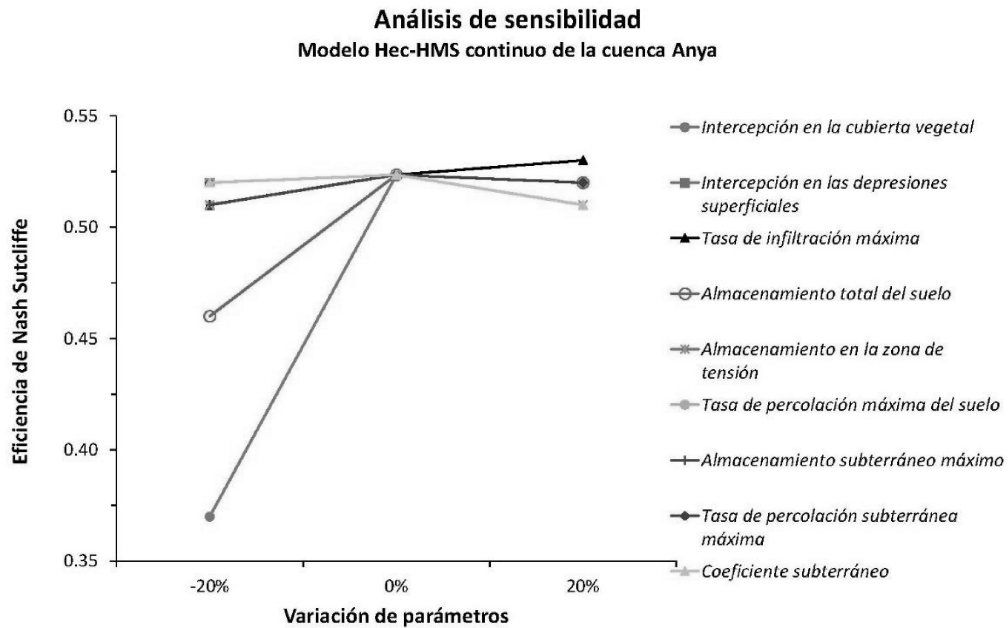


**Figura 115:** Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Anya, periodo dic11 – jun13

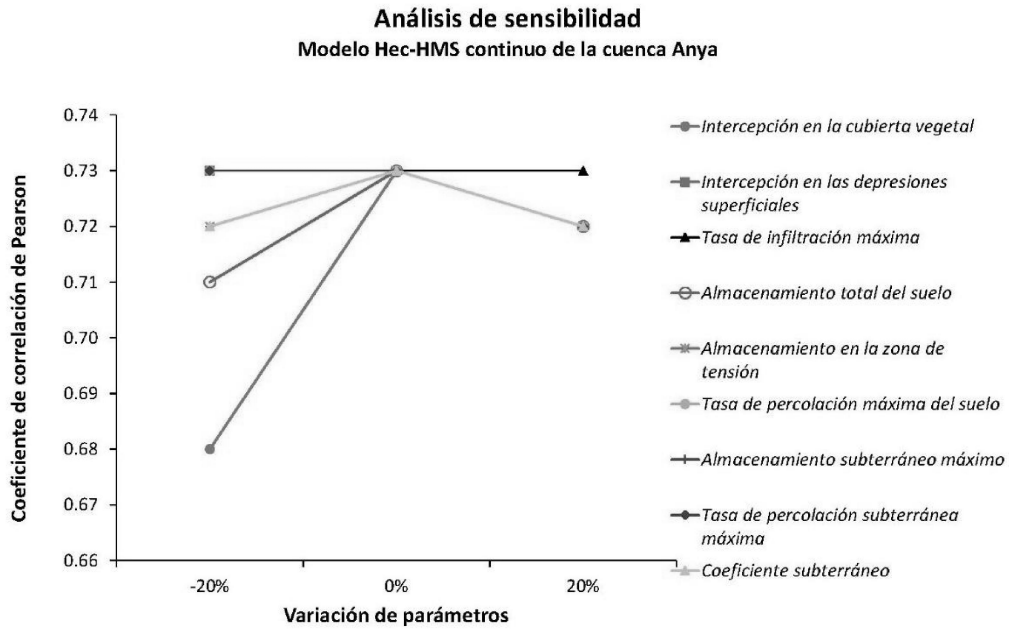


**Figura 116:** Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Anya, periodo dic11 – jun13

### *Sensibilidad del modelo de la cuenca Anya*



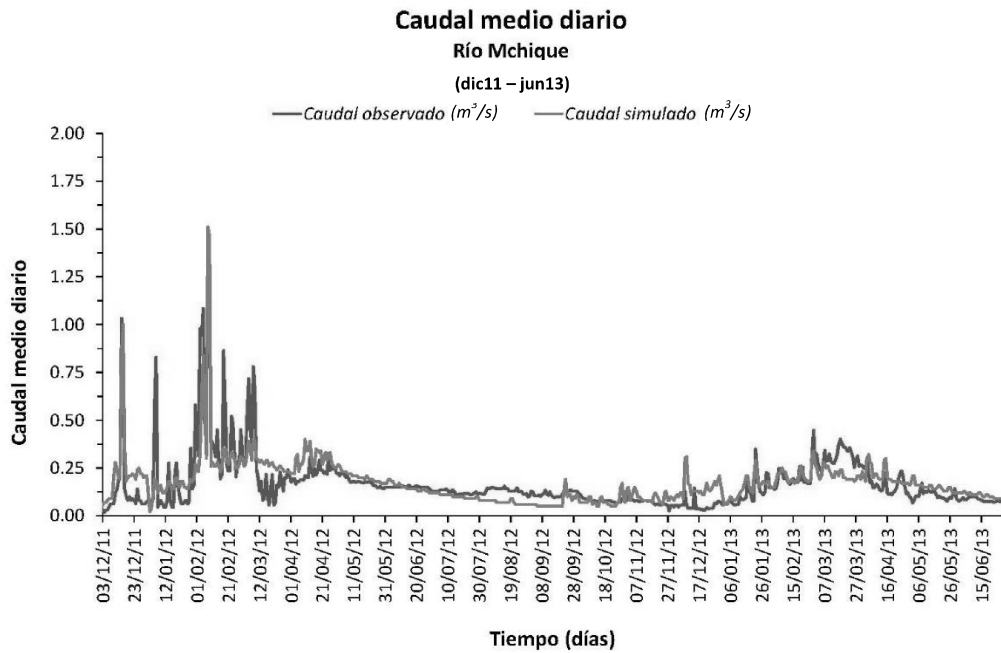
**Figura 117:** Sensibilidad de parámetros del modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Anya, eficiencia de Nash Sutcliffe



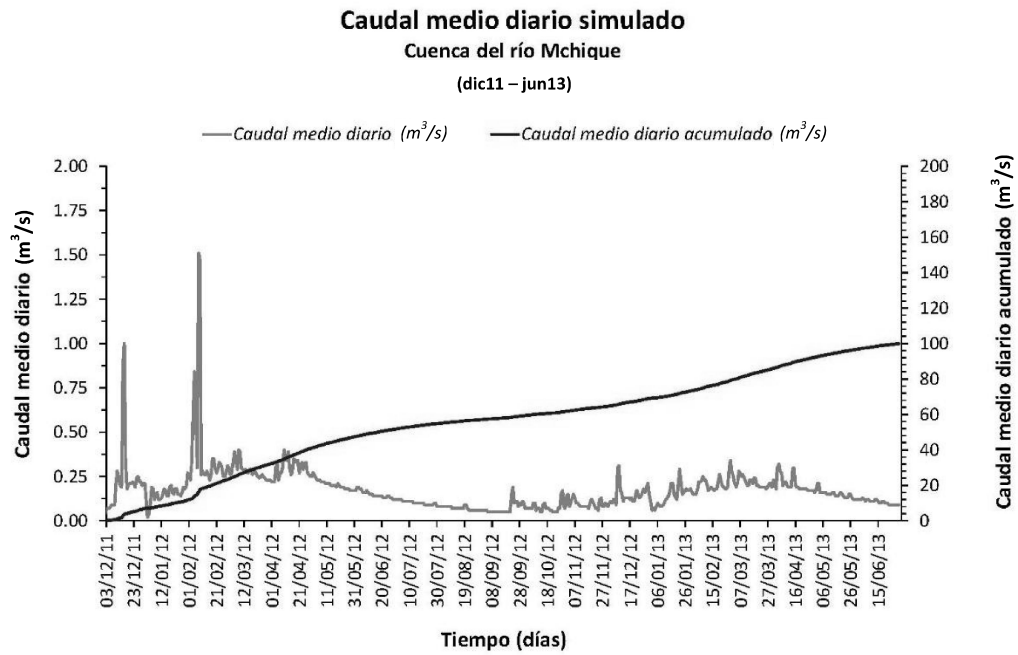
**Figura 118:** Sensibilidad de parámetros del modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Anya, coeficiente de correlación de Pearson

**b. Modelo hidrológico de la cuenca Mchique**

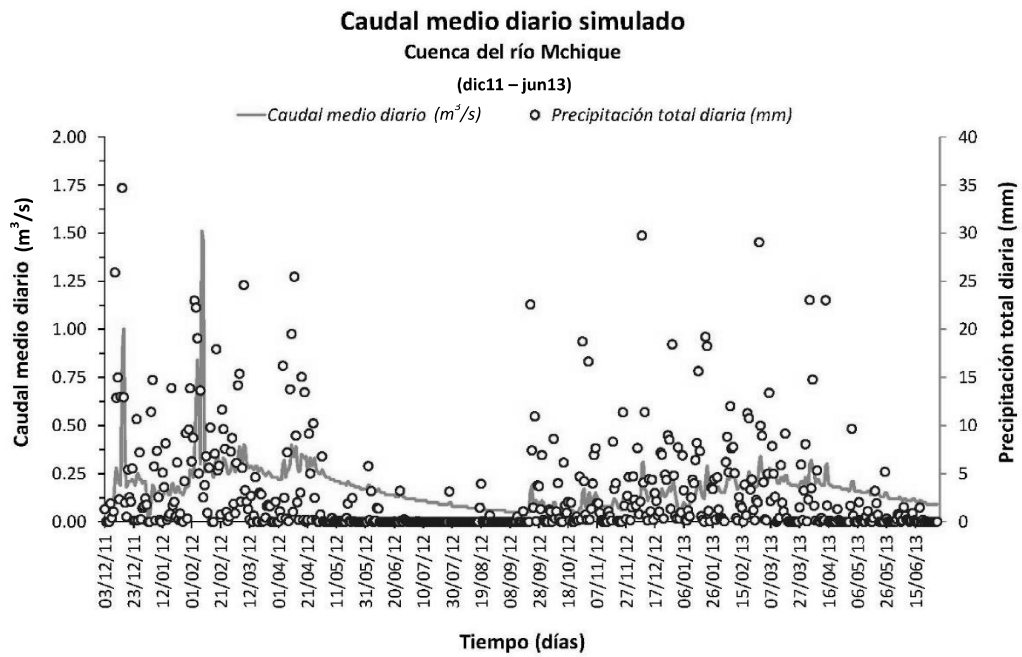
*Caudales observados y simulados en la cuenca Mchique*



**Figura 119:** Caudales medios diarios observados y simulados del río Mchique, periodo dic11 – jun13

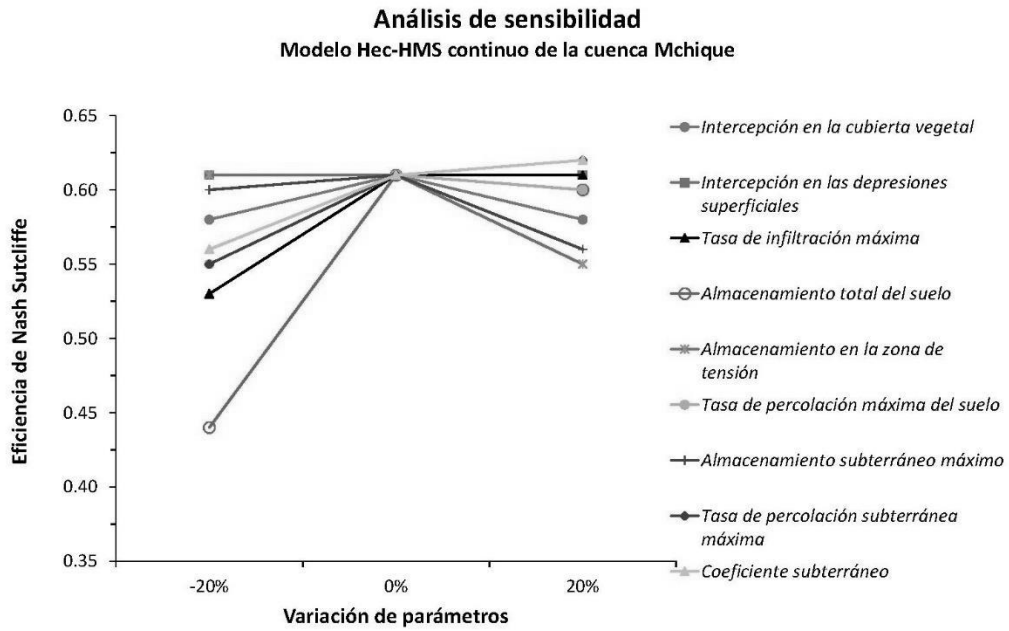


**Figura 120:** Serie simulada de caudales medios diarios y caudales medios diarios acumulados del río Mchique, periodo dic11 – jun13

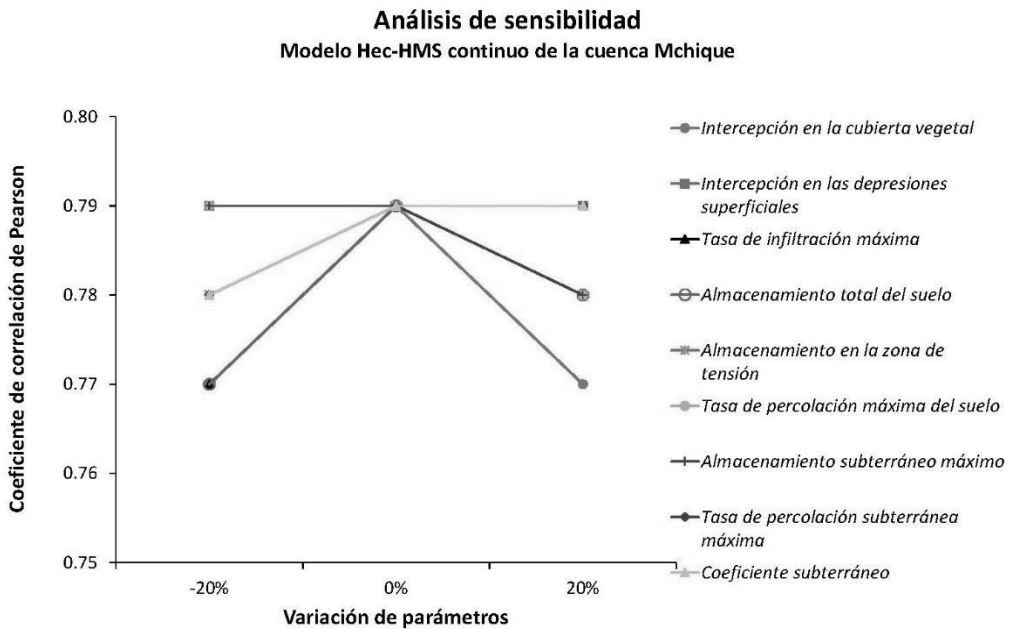


**Figura 121:** Caudales medios diarios simulados y precipitación total diaria en la cuenca Mchique, periodo dic11 – jun13

## Sensibilidad del modelo de la cuenca Mchique



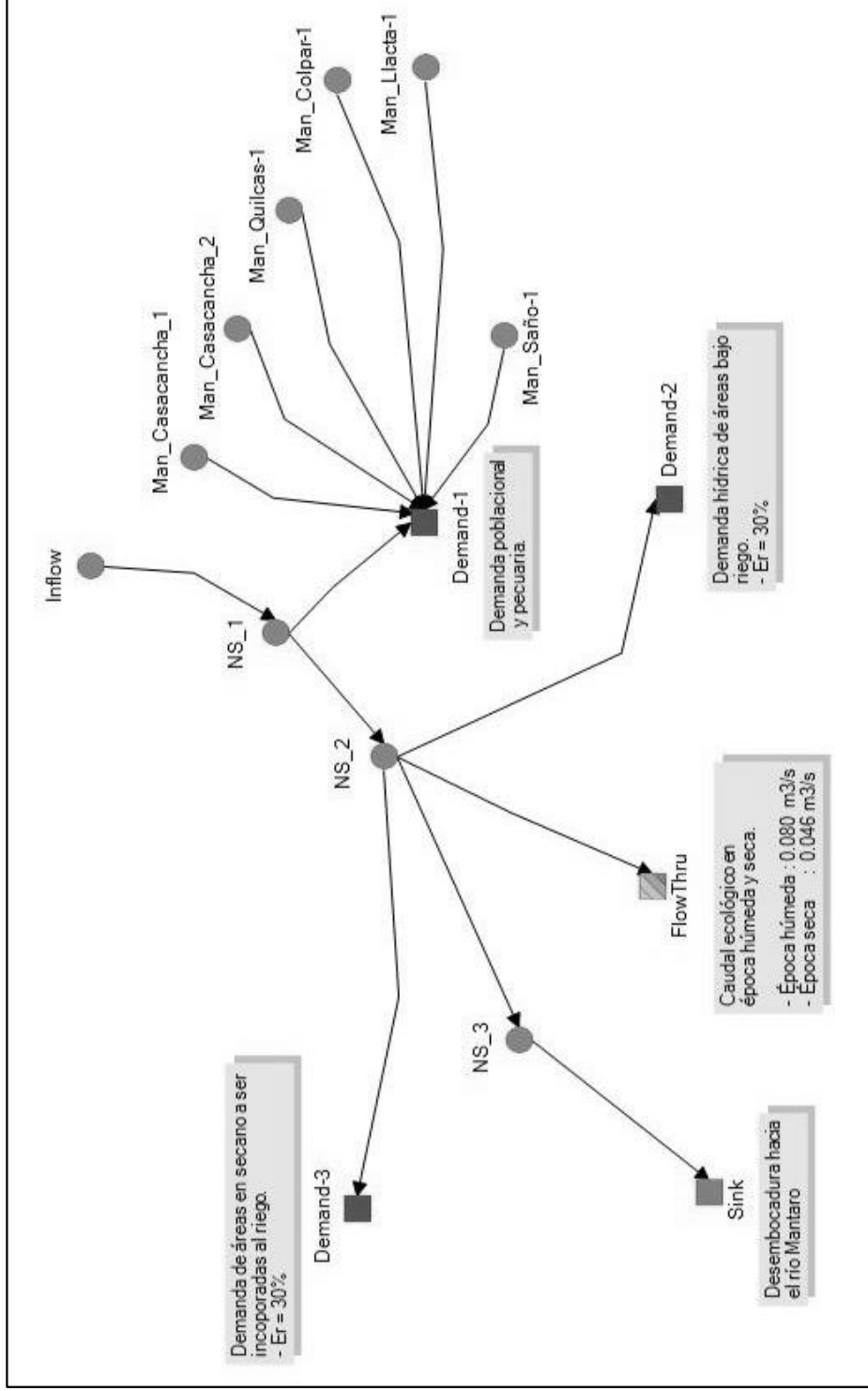
**Figura 122:** Sensibilidad de parámetros del modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Mchique, eficiencia de Nash Sutcliffe



**Figura 123:** Sensibilidad de parámetros del modelo continuo Hec-HMS de la cuenca Mchique, coeficiente de correlación de Pearson

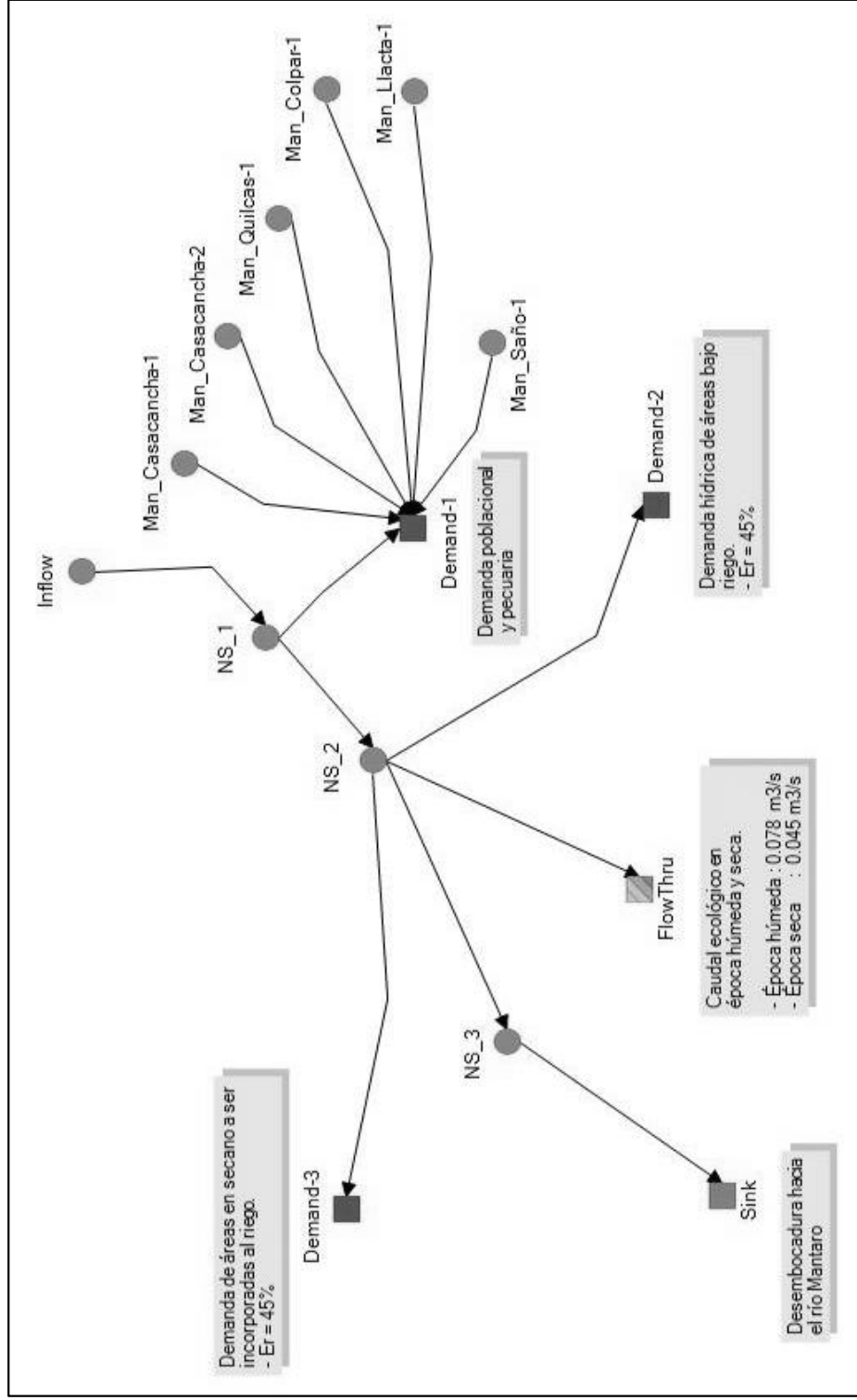
Anexo 3.2: De los escenarios futuros

a. Esquema hidráulico de la cuenca Anya; escenarios a corto, mediano y largo plazo

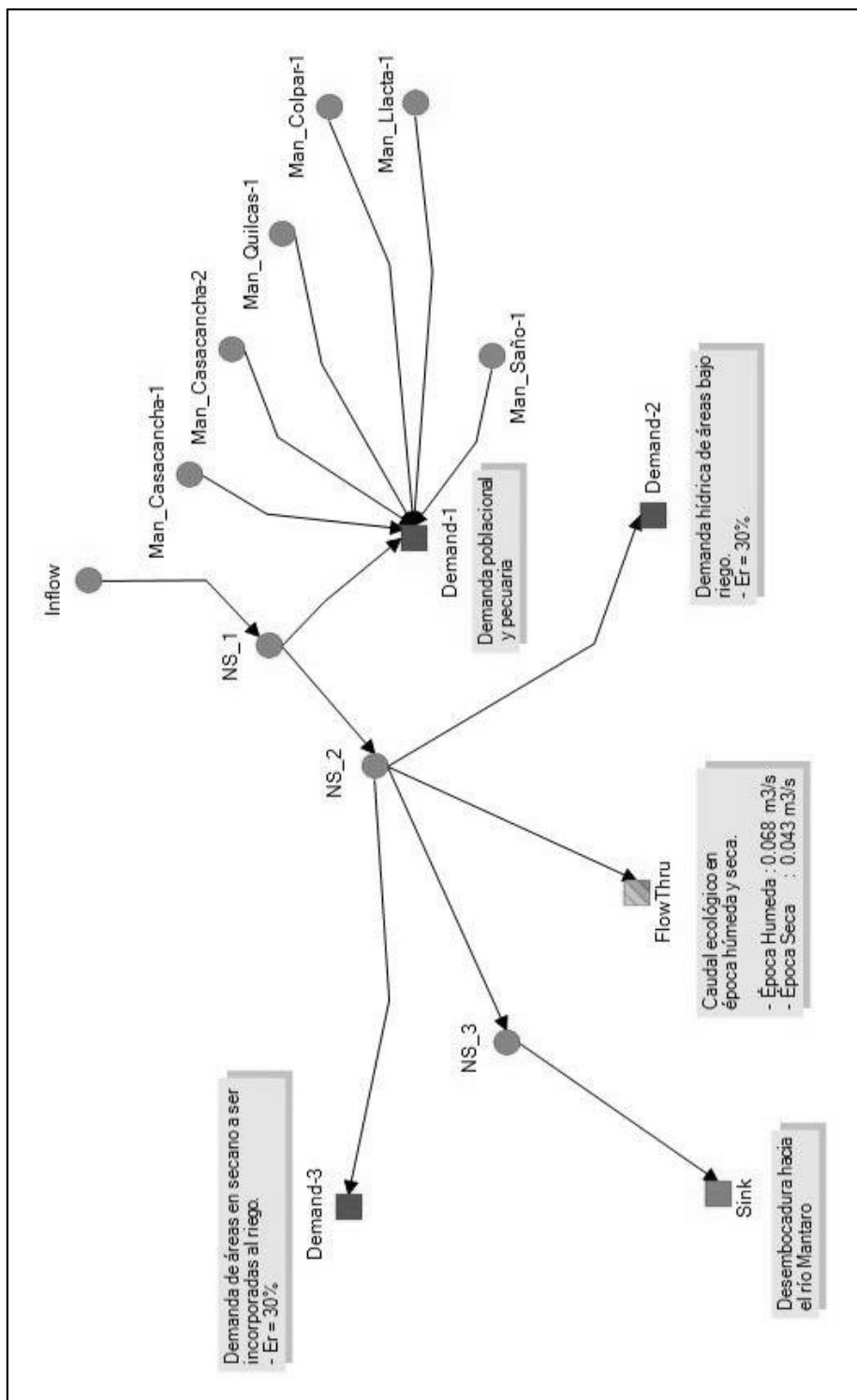


**Figura 124:** Esquema hidráulico del escenario I de la cuenca Anya (2017)

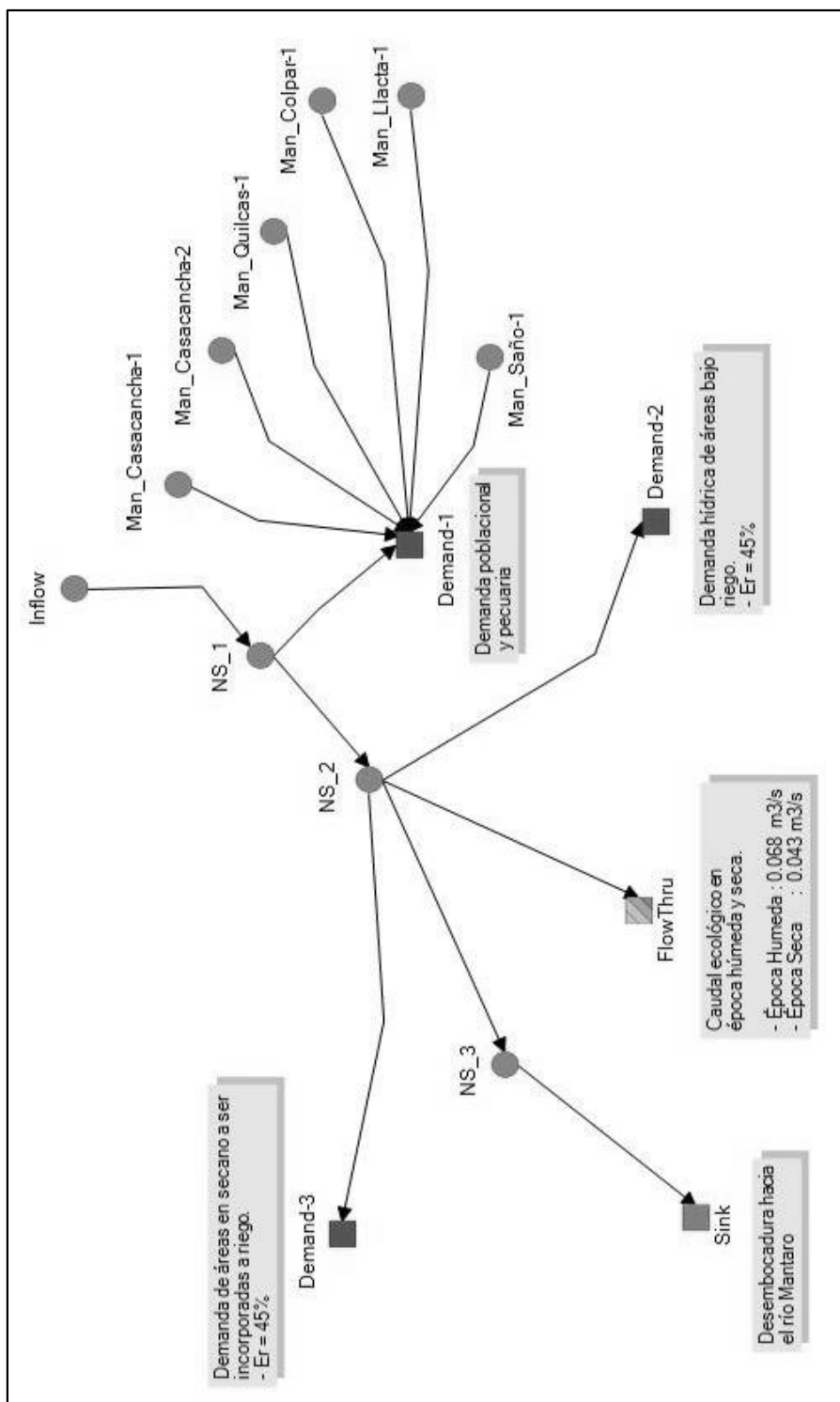




**Figura 125:** Esquema hidráulico del escenario II de la cuenca Anya (2022)

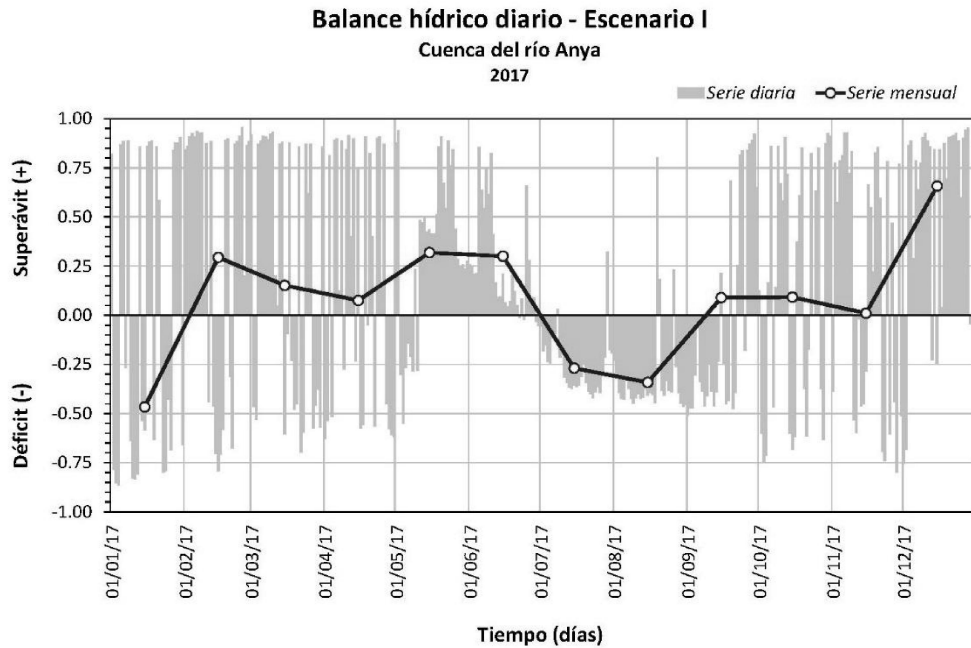


**Figura 126:** Esquema hidráulico del escenario III de la cuenca Anya (2050)

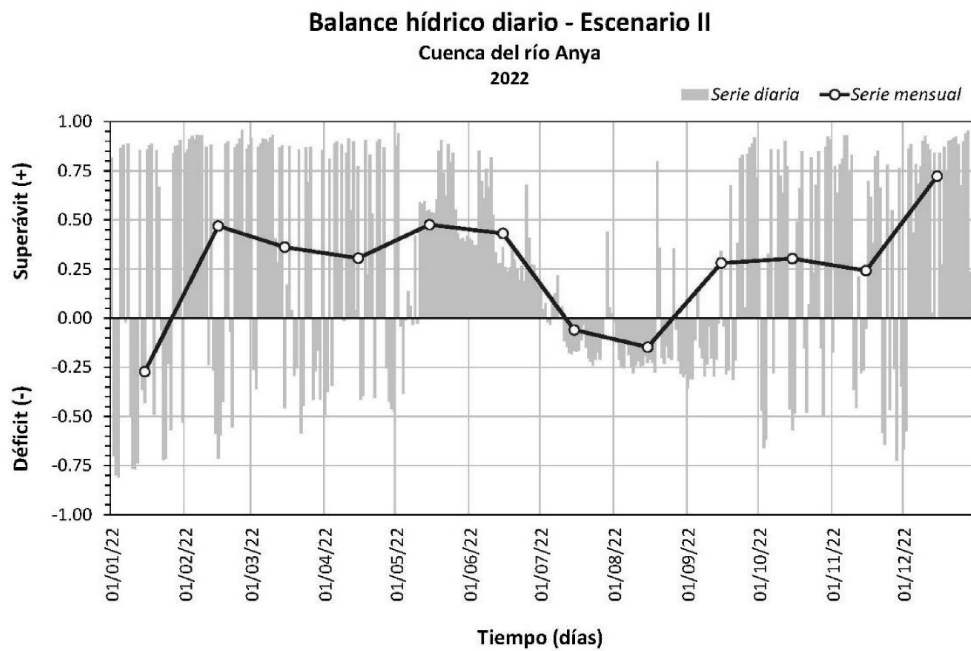


**Figura 127:** Esquema hidráulico del escenario IV de la cuenca Anya (2050)

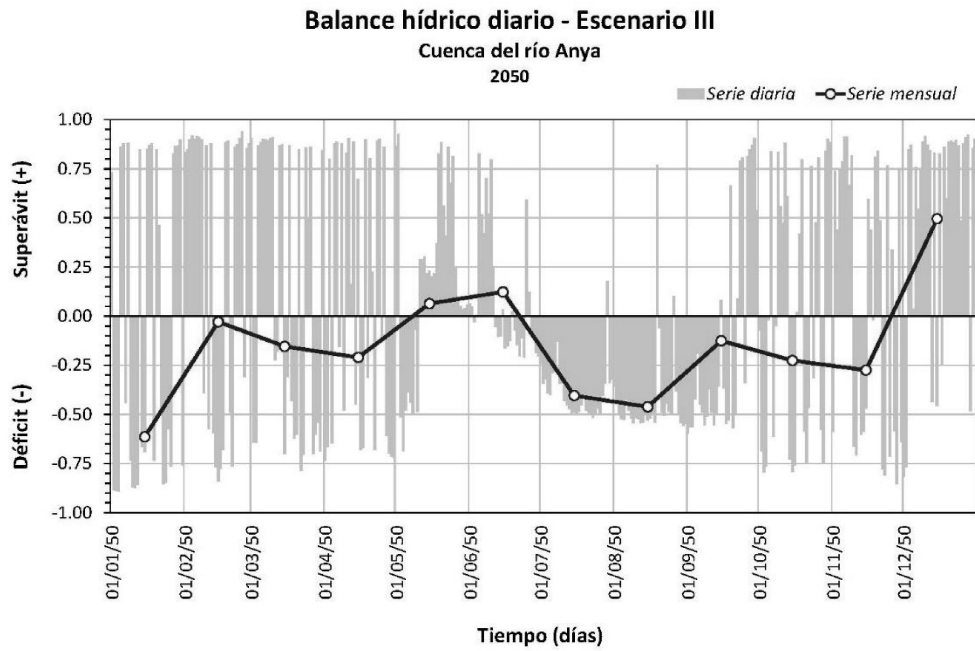
**b. Balance hídrico de los escenarios futuros de la cuenca Anya**



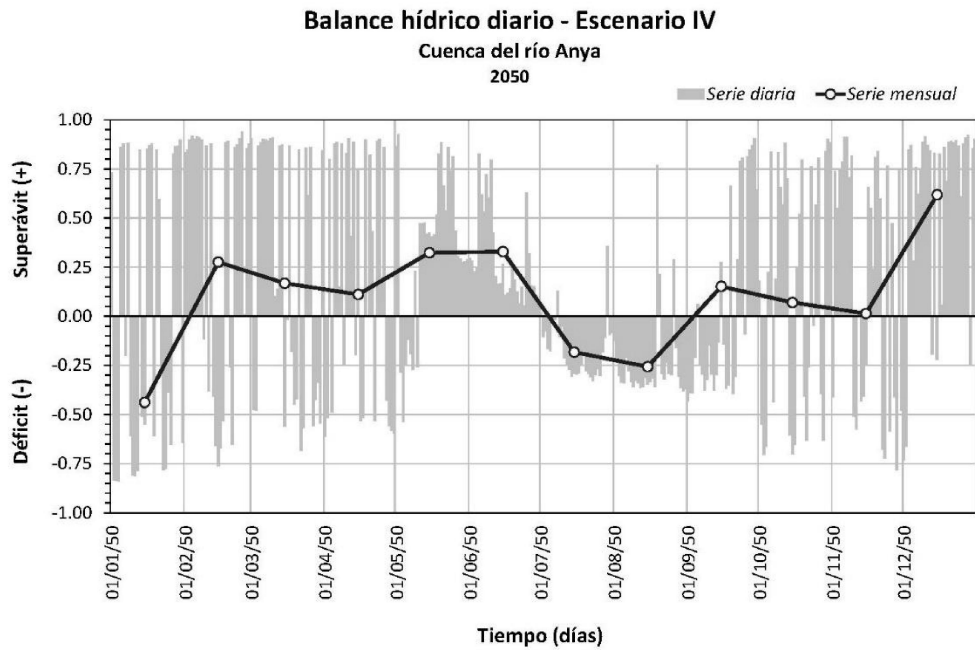
**Figura 128:** Balance hídrico del escenario I de la cuenca Anya (2017)



**Figura 129:** Balance hídrico del escenario II de la cuenca Anya (2022)

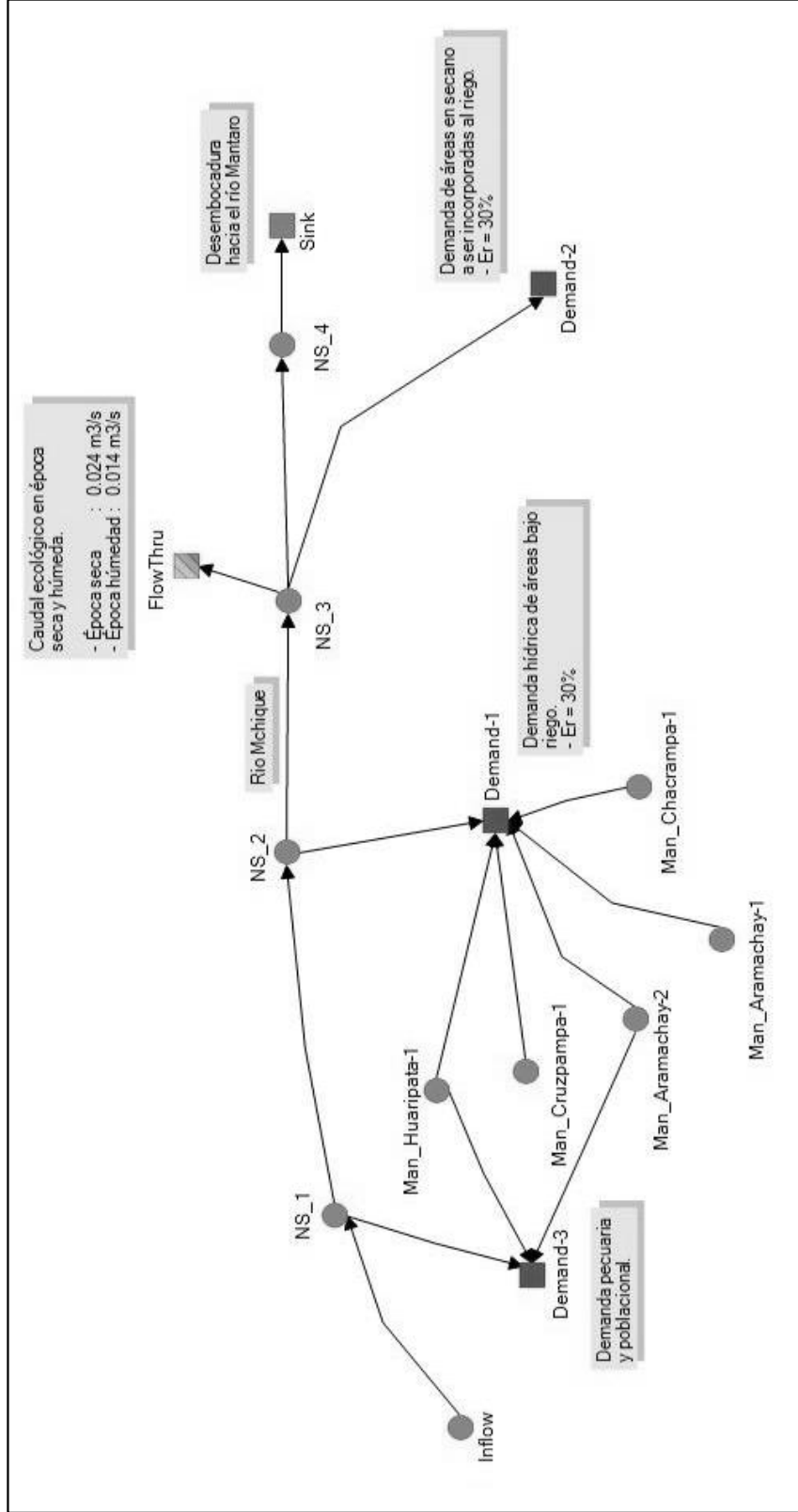


**Figura 130:** Balance hídrico del escenario III de la cuenca Anya (2050)

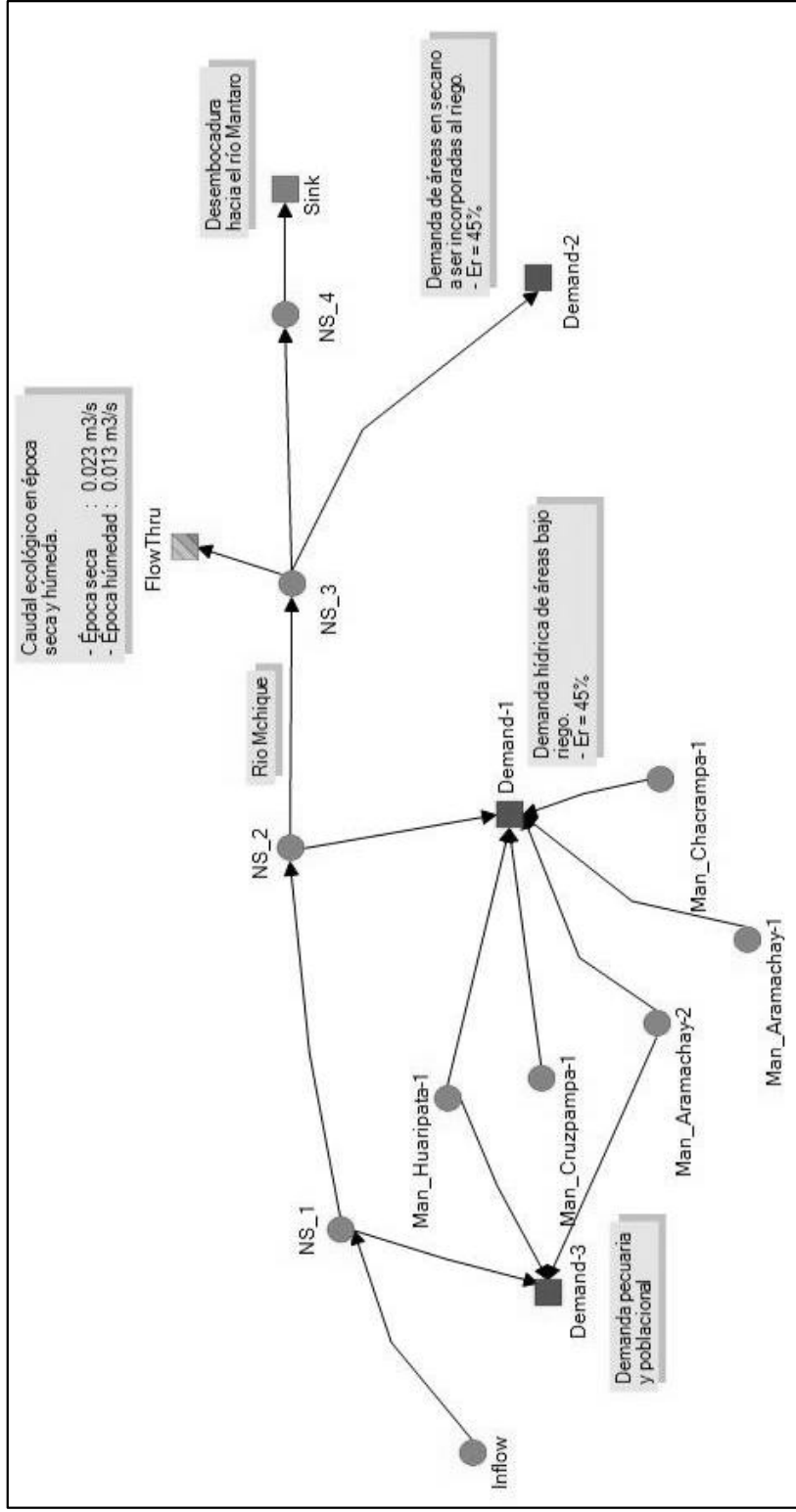


**Figura 131:** Balance hídrico del escenario IV de la cuenca Anya (2050)

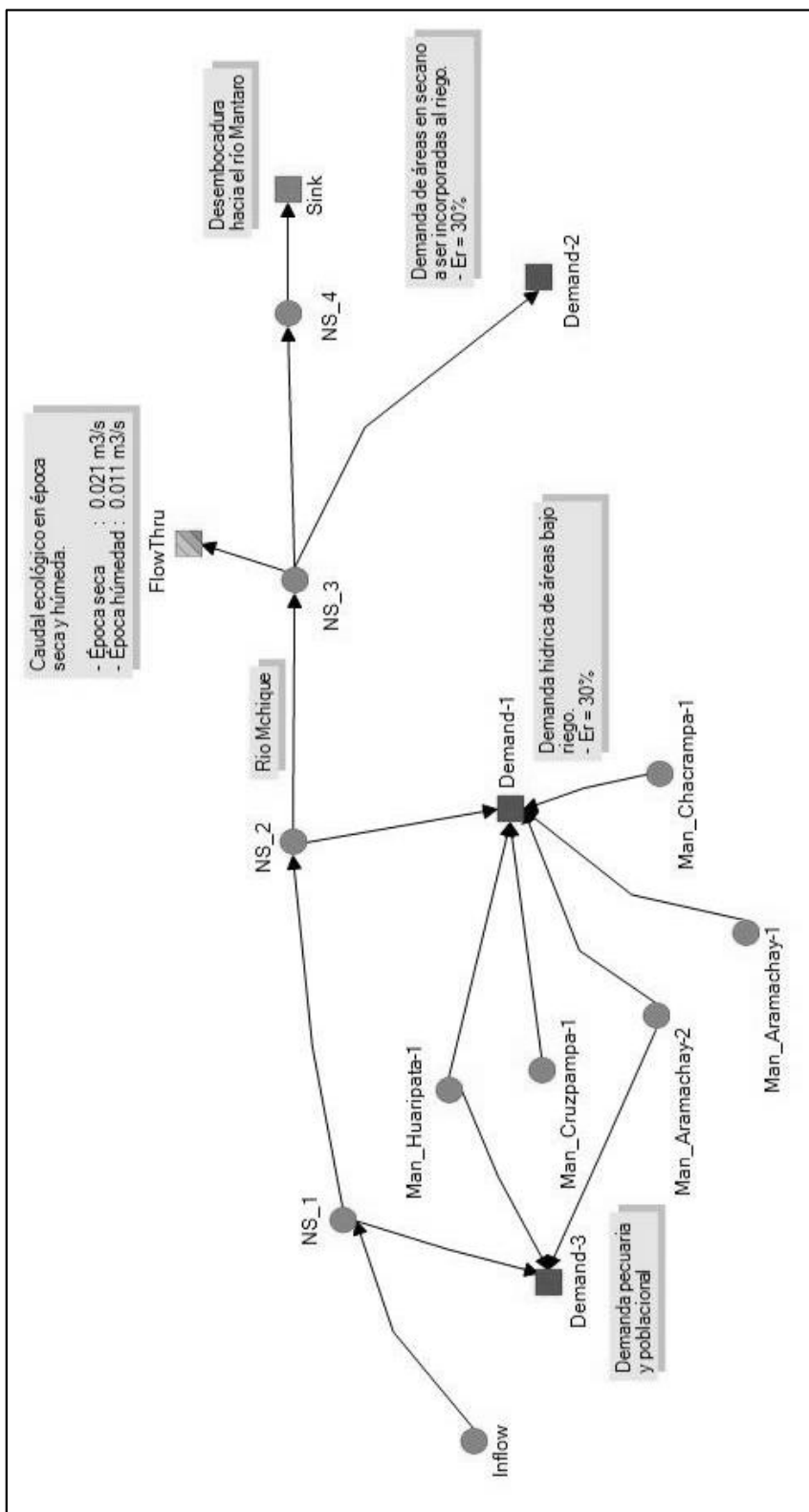
c. Esquema hidráulico de la cuenca Mchique; escenarios a corto, mediano y largo plazo



**Figura 132:** Esquema hidráulico del escenario I de la cuenca Mchique (2017)

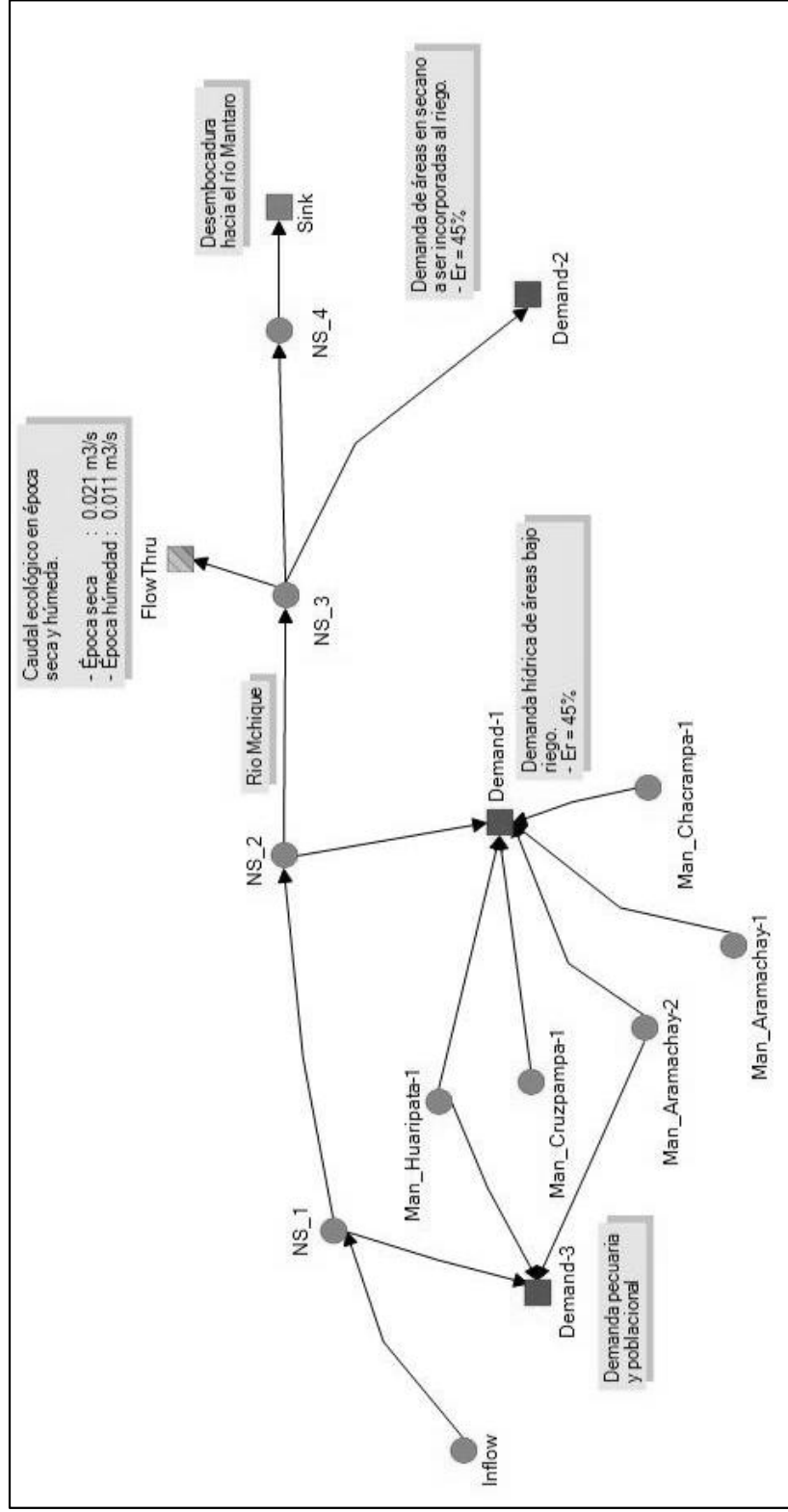


**Figura 133:** Esquema hidráulico del escenario II de la cuenca Mchique (2022)



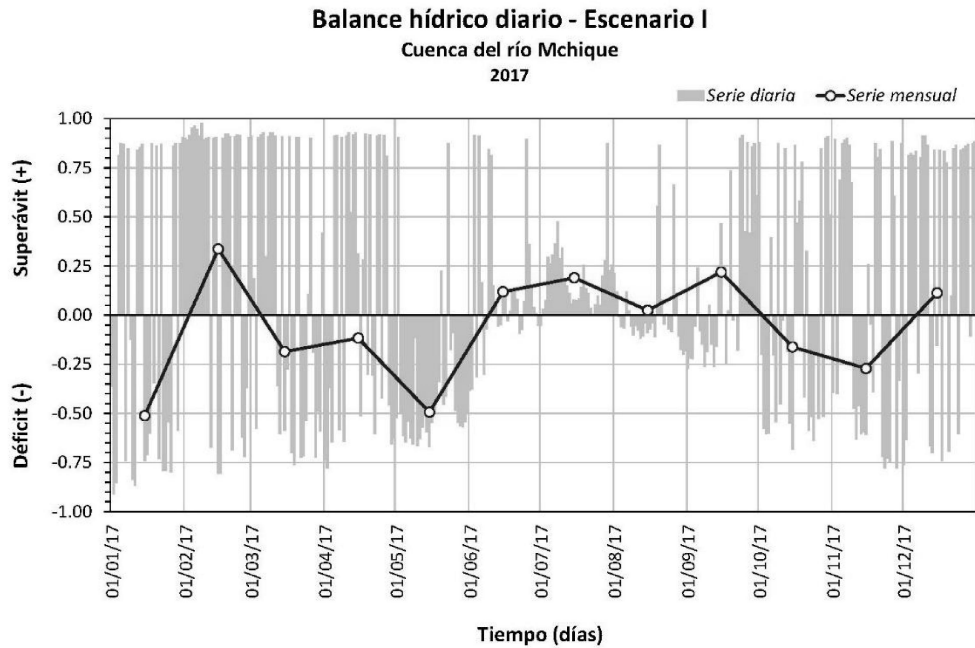
**Figura 134:** Esquema hidráulico del escenario III de la cuenca Mchique (2050)



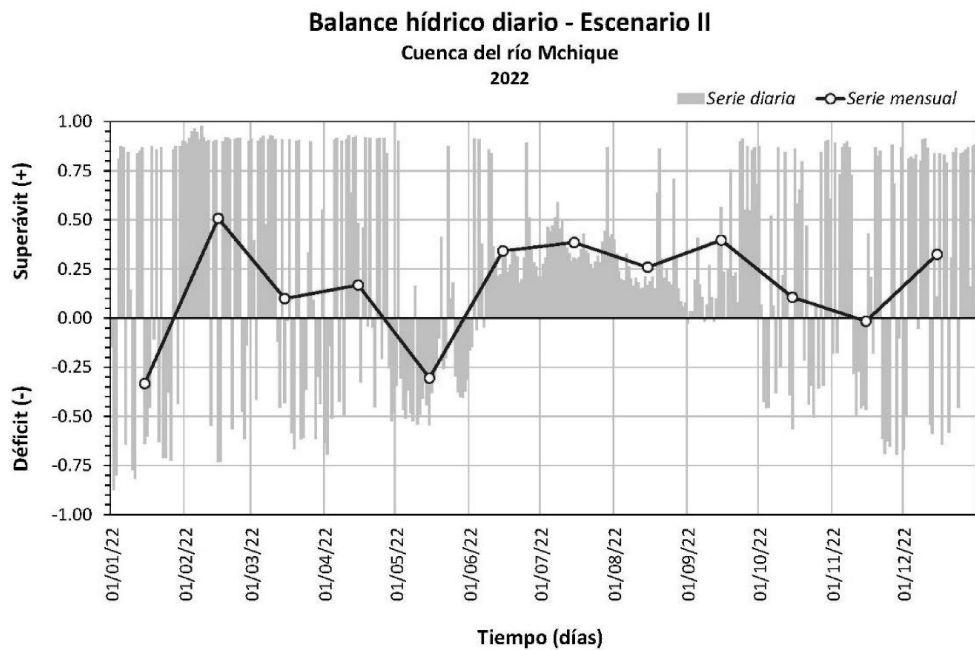


**Figura 135:** Esquema hidráulico del escenario IV de la cuenca Mchique (2050)

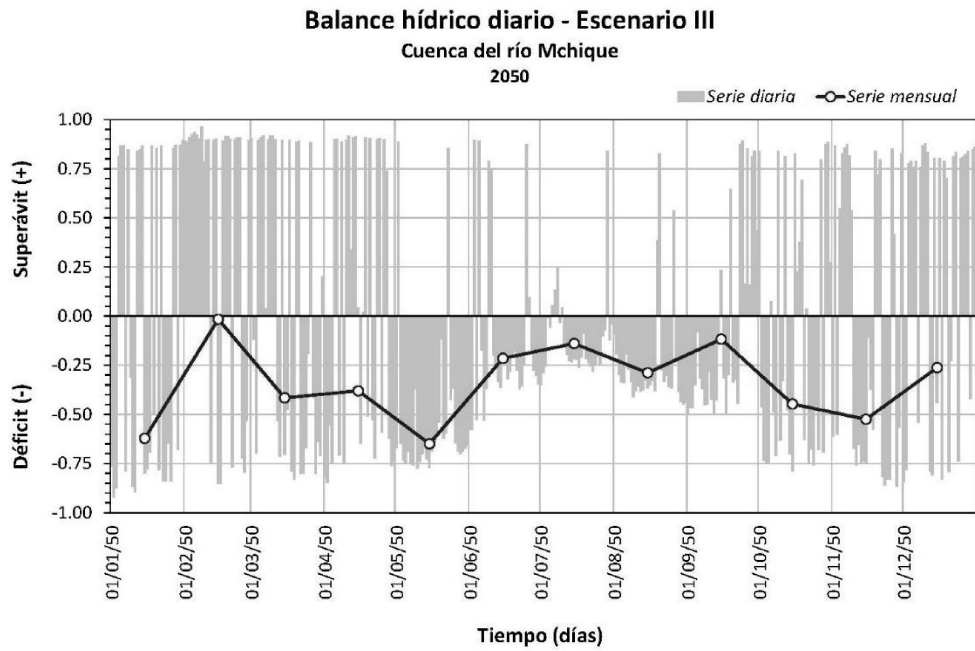
**d. Balance hídrico de los escenarios futuros de la cuenca Mchique**



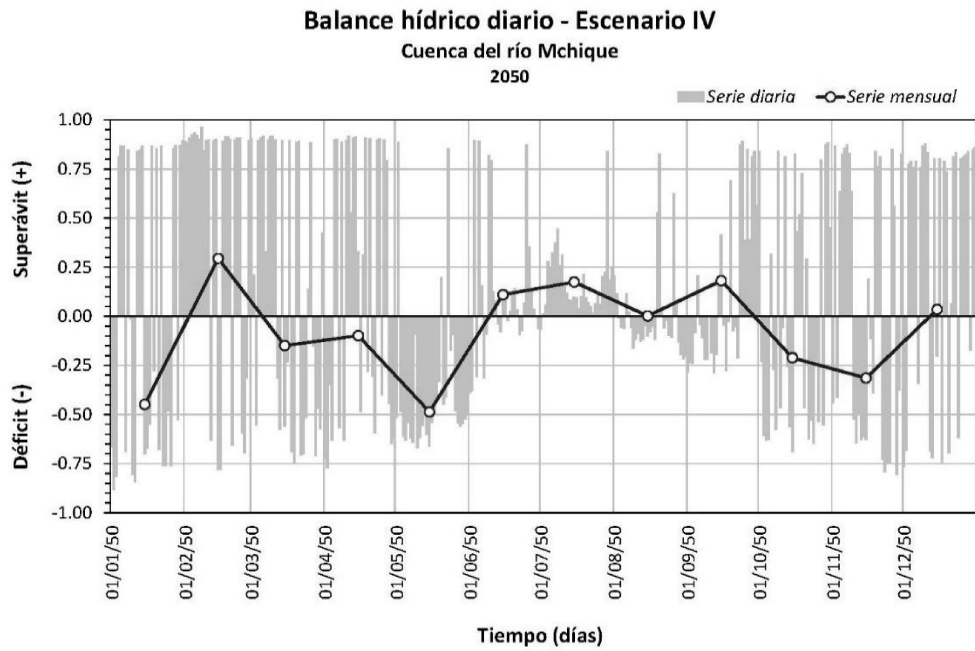
**Figura 136:** Balance hídrico del escenario I de la cuenca Mchique (2017)



**Figura 137:** Balance hídrico del escenario II de la cuenca Mchique (2022)

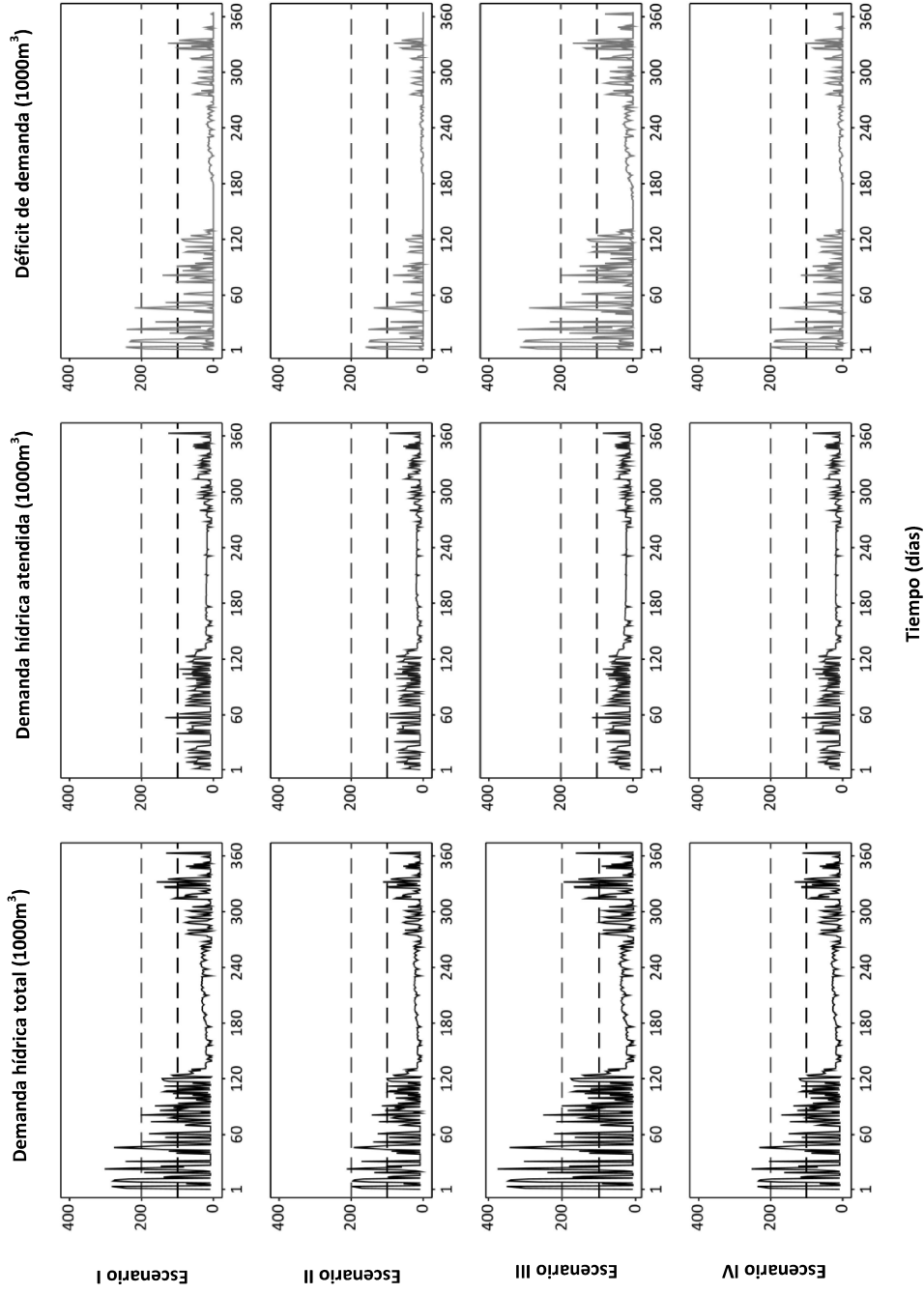


**Figura 138:** Balance hídrico del escenario III de la cuenca Mchique (2050)

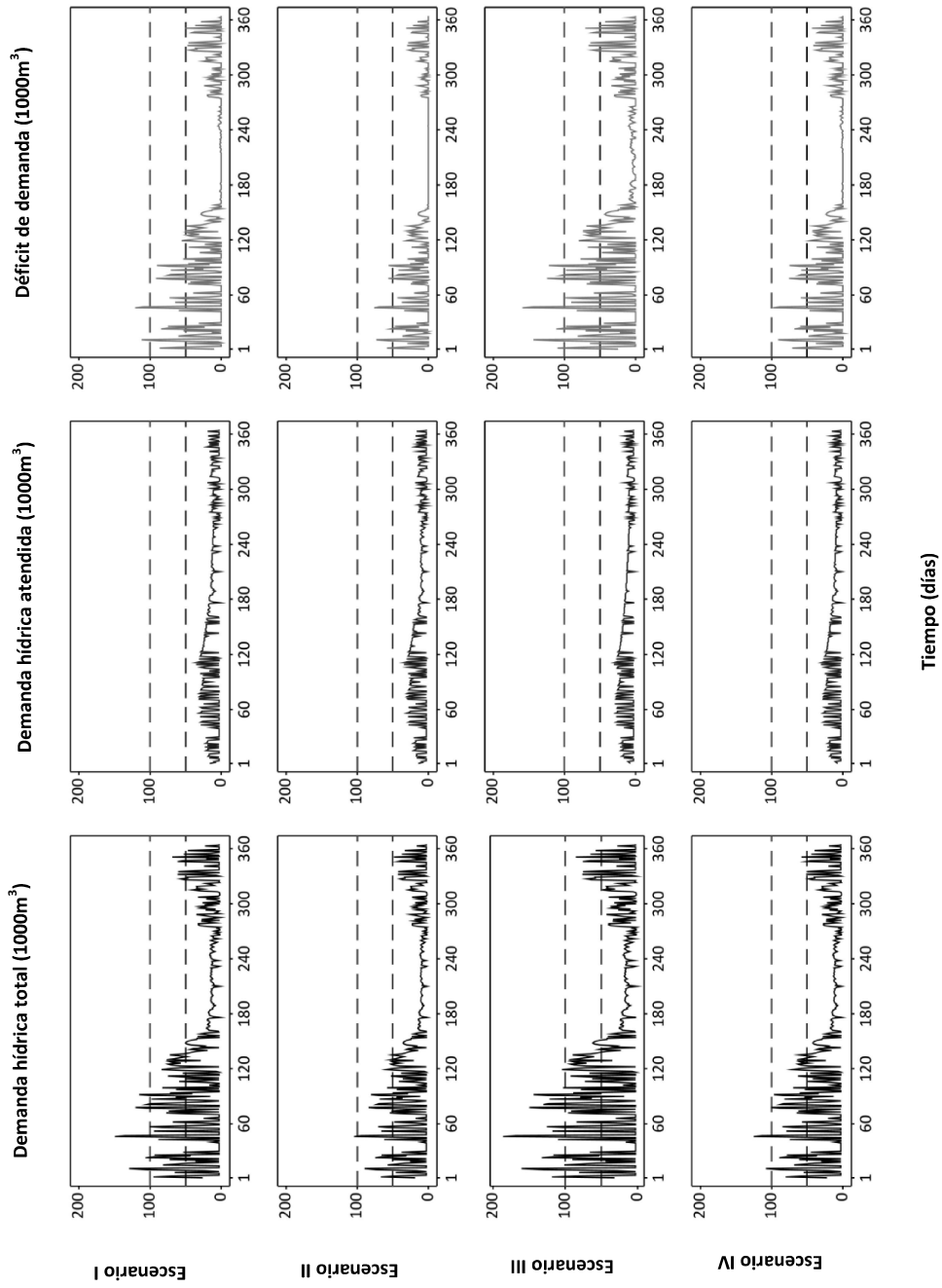


**Figura 139:** Balance hídrico del escenario IV de la cuenca Mchique (2050)

**e. Comparativo de la demanda hídrica de las cuencas Anya y Mehique; escenarios I, II III y IV**

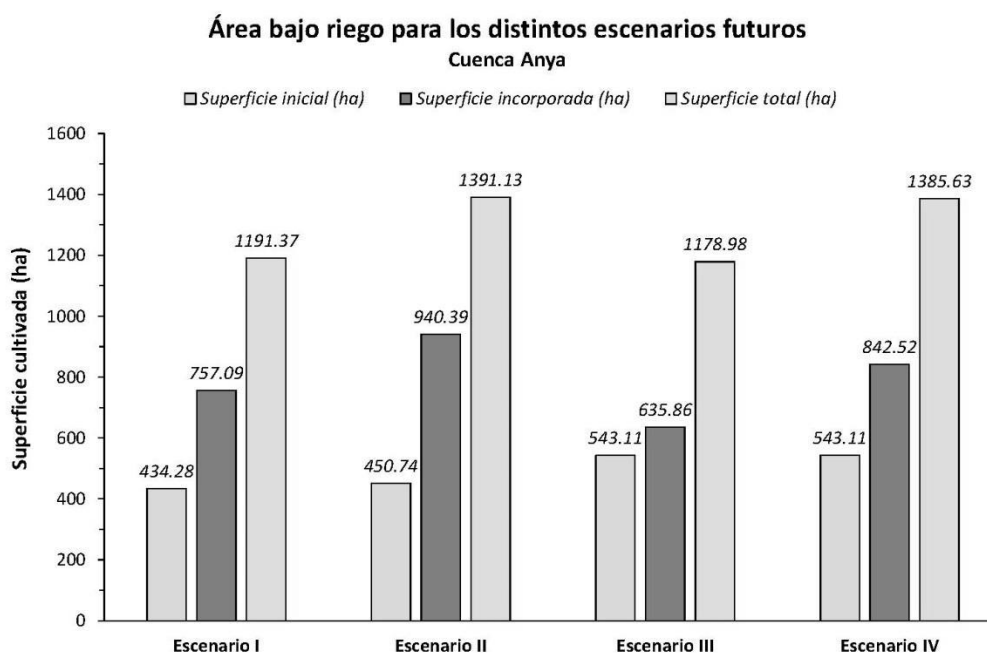


**Figura 140:** Comportamiento de la demanda hídrica de los escenarios futuros de la cuenca Anya

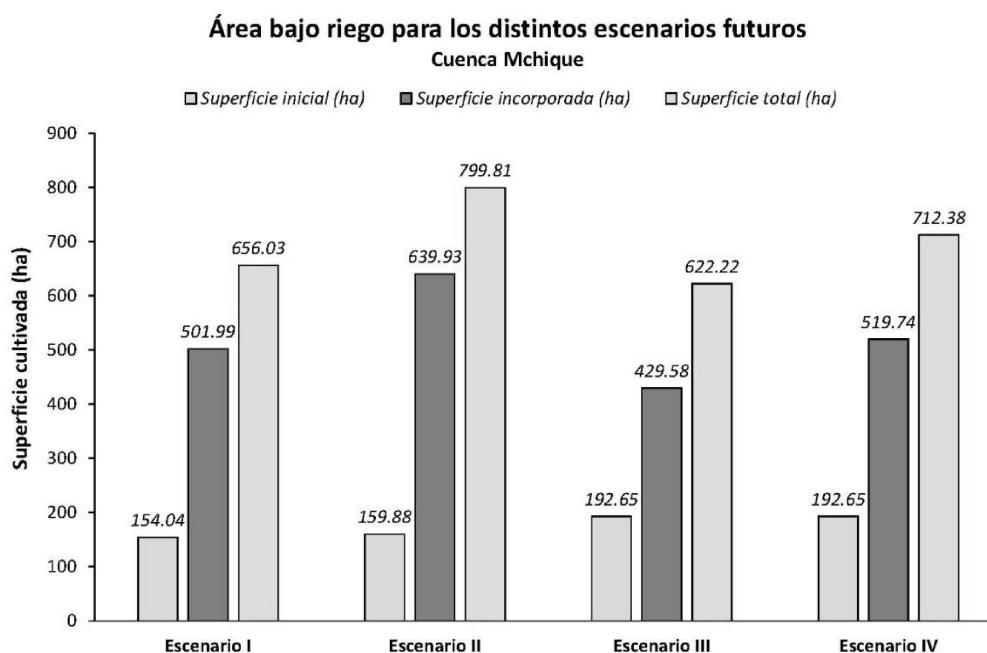


**Figura 141:** Comportamiento de la demanda hídrica de los escenarios futuros de la cuenca Mchique

**f. Superficie incorporada al riego en las cuencas Anya y Mchique; escenarios futuros I, II, III y IV**



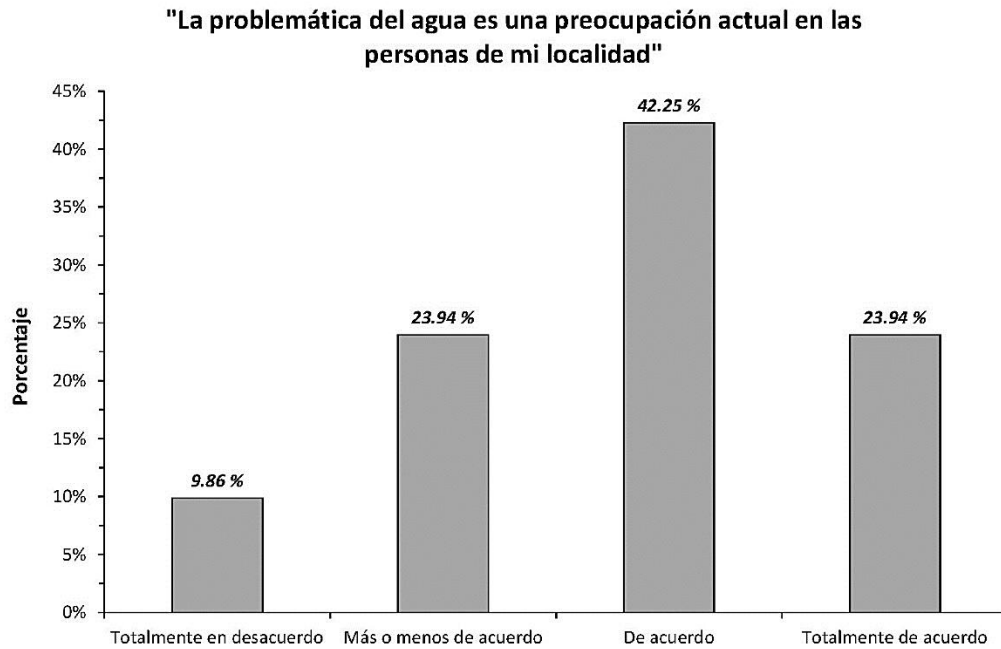
**Figura 142:** Superficie total bajo riego (ha) en la cuenca Anya, para los escenarios I, II, III y IV



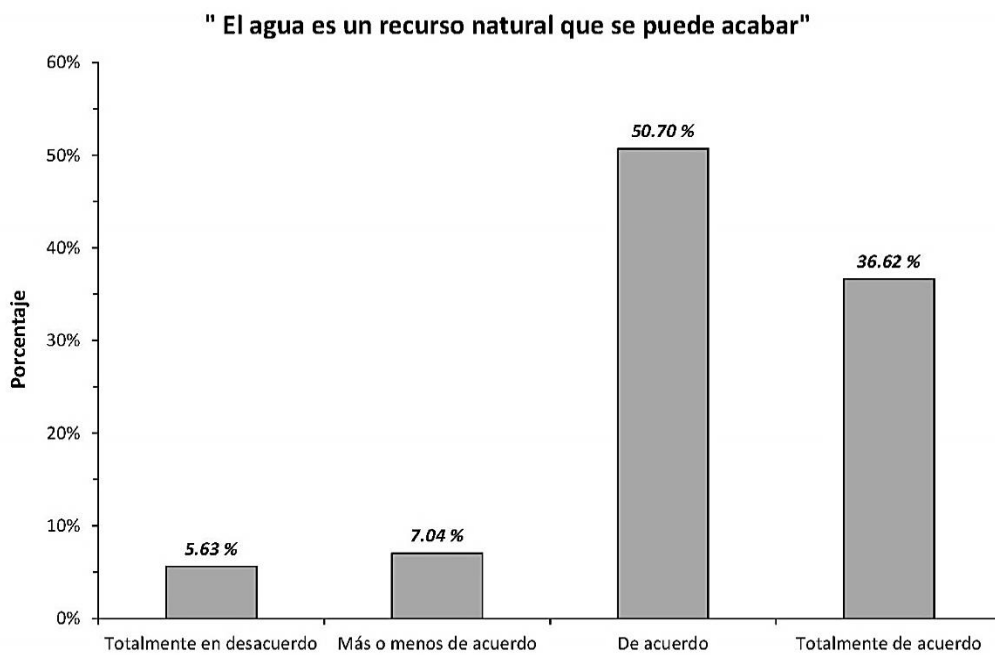
**Figura 143:** Superficie total bajo riego (ha) en la cuenca Mchique, para los escenarios I, II, III y IV

## Anexo 4: De la descripción de la percepción de la problemática de los recursos hídricos

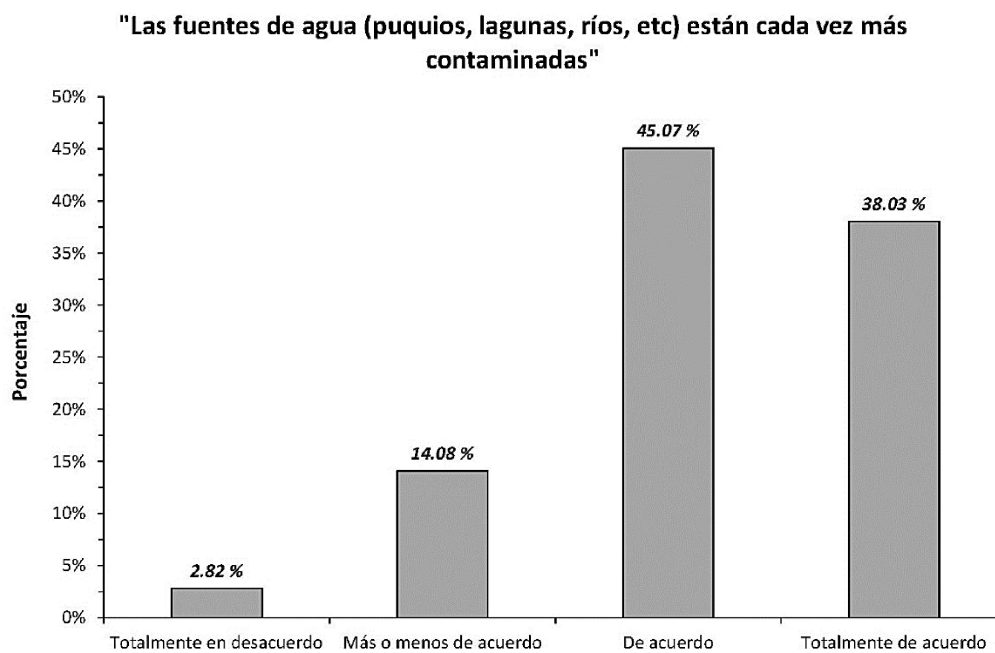
### Anexo 4.1: Caso de la cuenca Anya



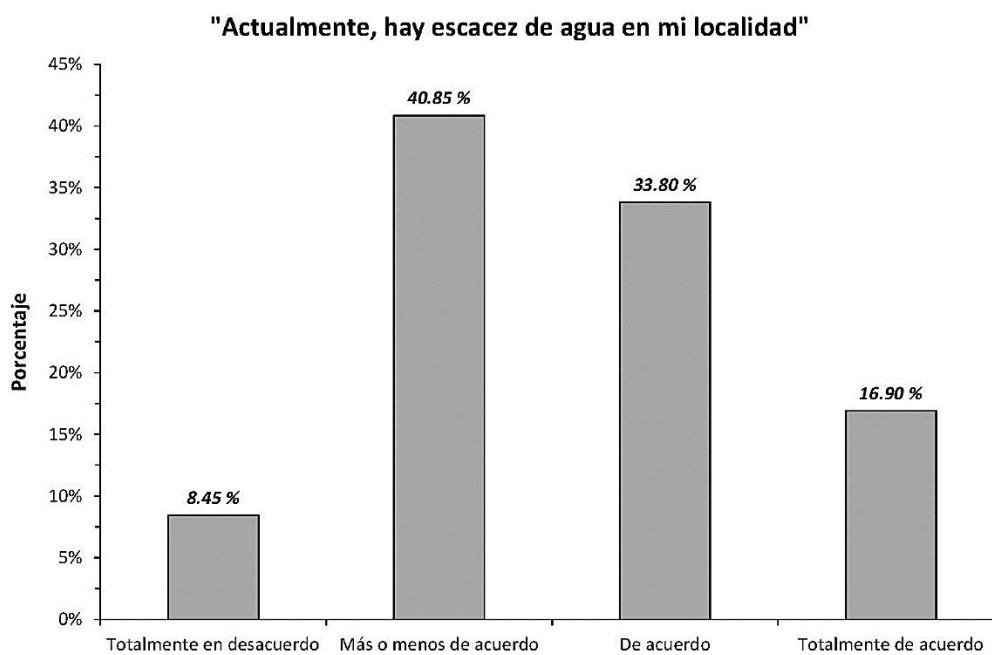
**Figura 144:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 1



**Figura 145:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 2

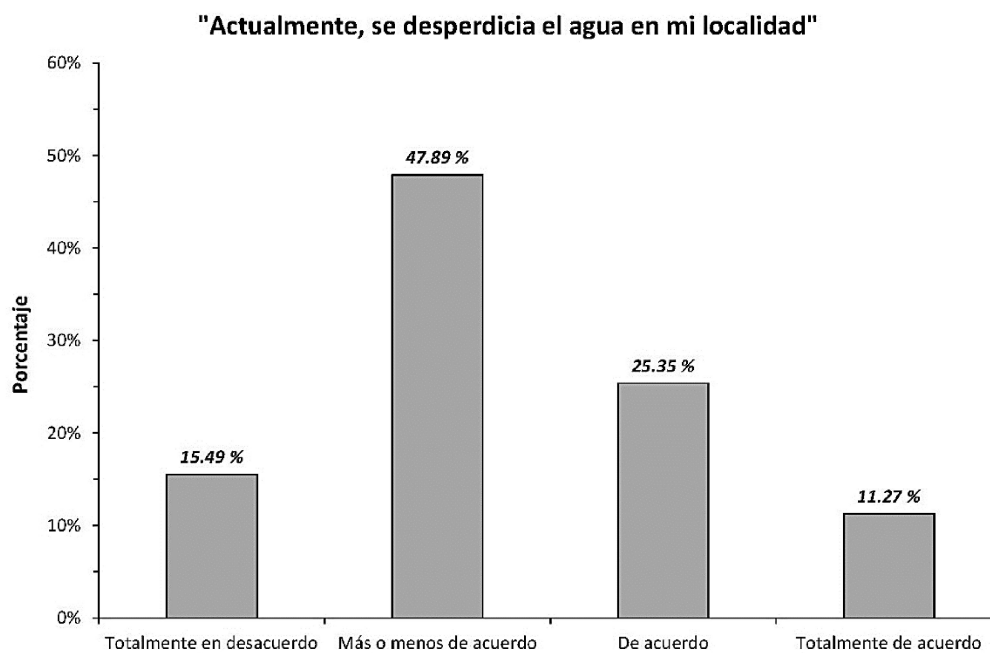


**Figura 146:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 3

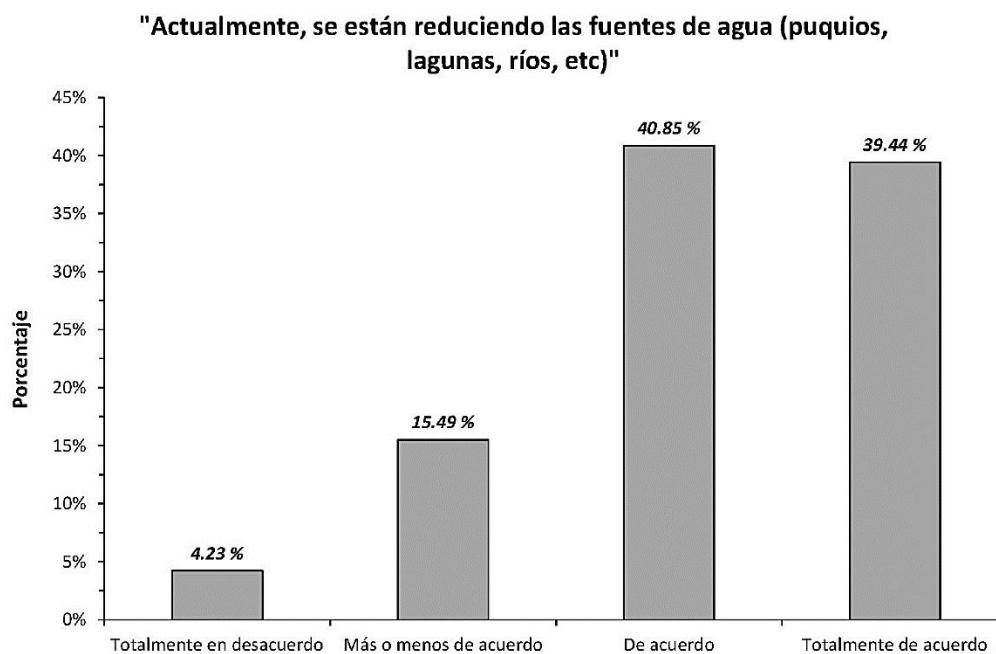


**Figura 147:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 4

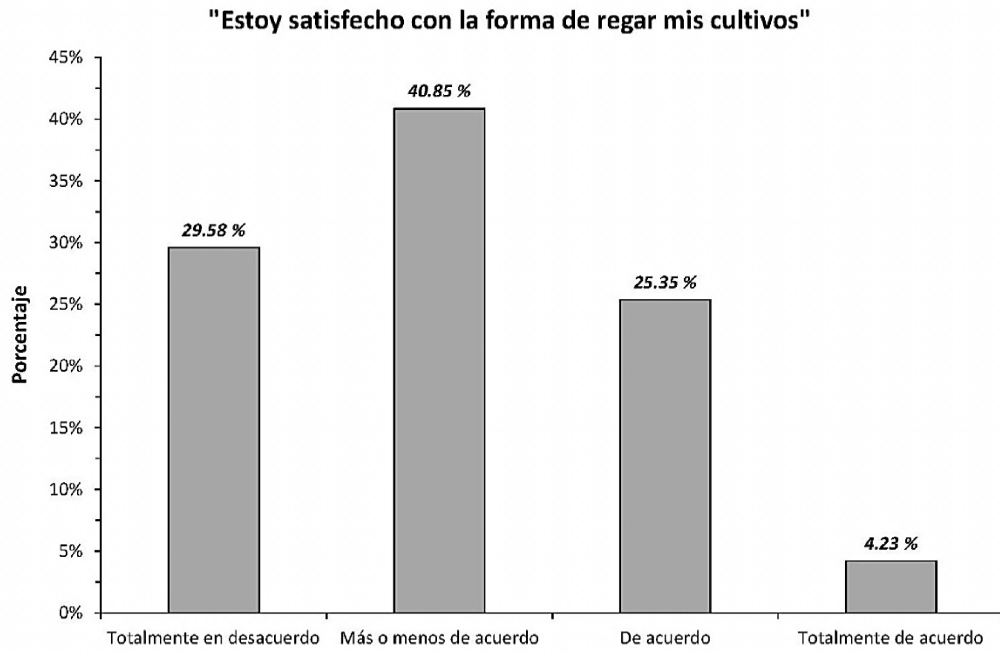




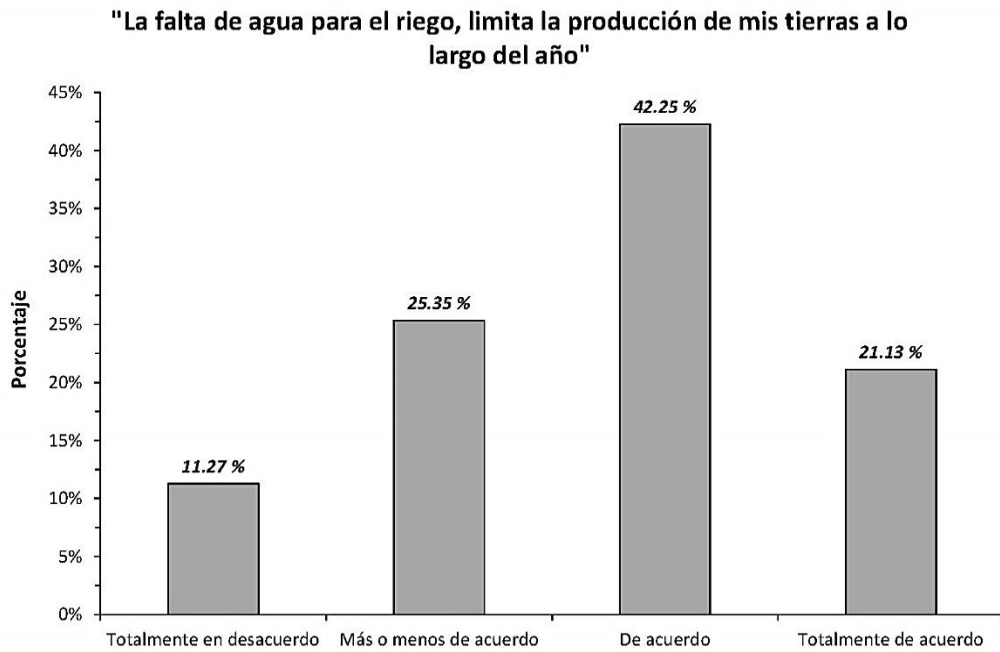
**Figura 148:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 5



**Figura 149:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 6



**Figura 150:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 7

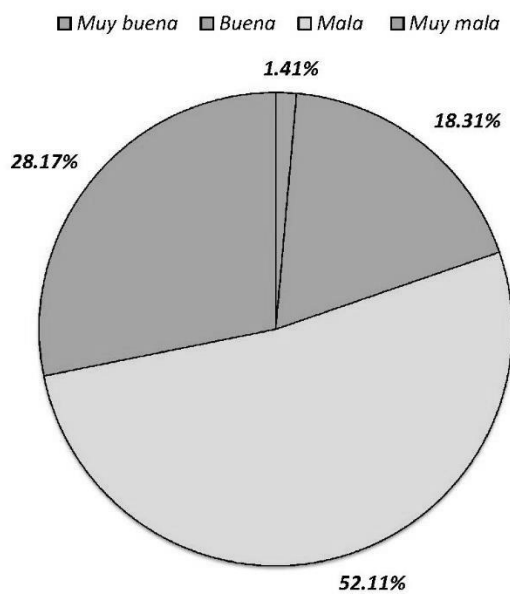


**Figura 151:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 8



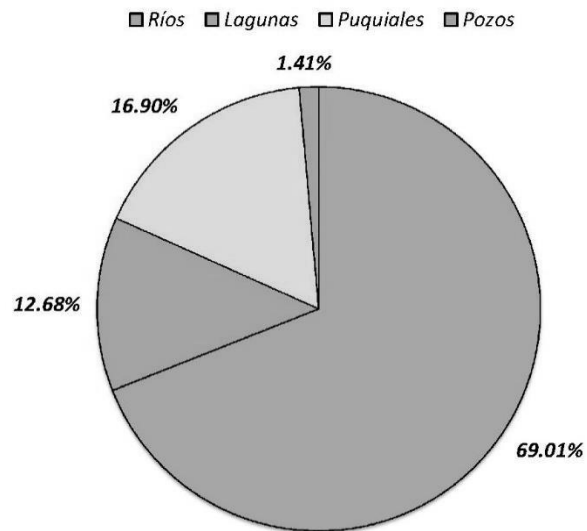
**Figura 152:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Anya - 9

**¿Cómo encuentras actualmente Ud. la calidad del agua del río Anya?**



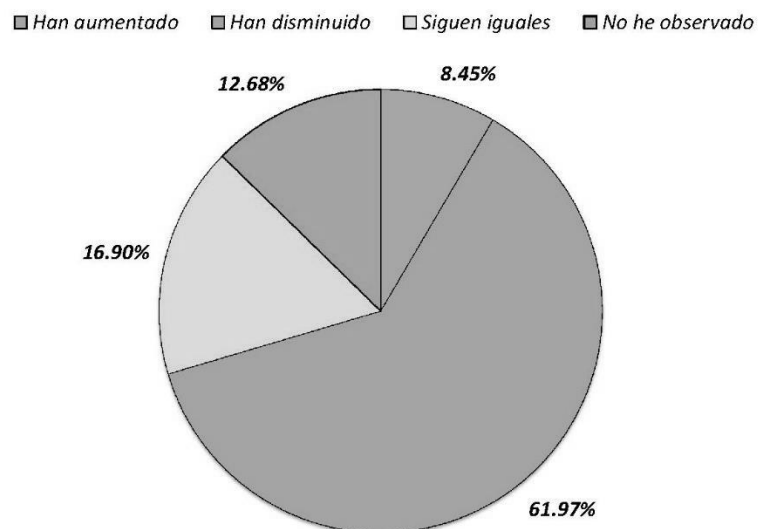
**Figura 153:** Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Anya - 1

**¿Cuál de las siguientes fuentes de agua, considera Ud. se encuentra en mal uso?**

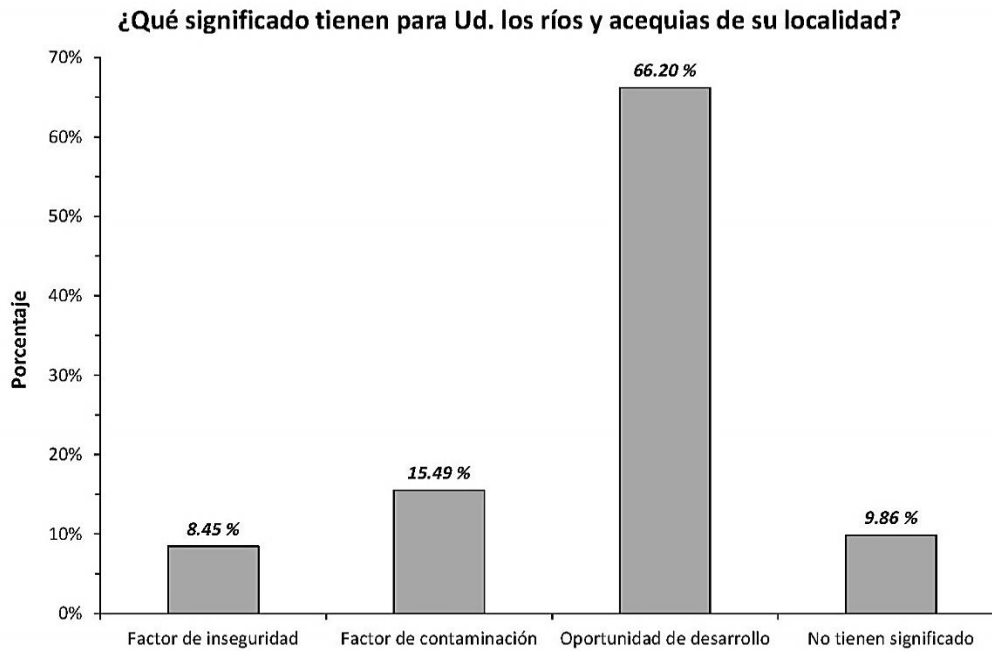


**Figura 154:** Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Anya - 2

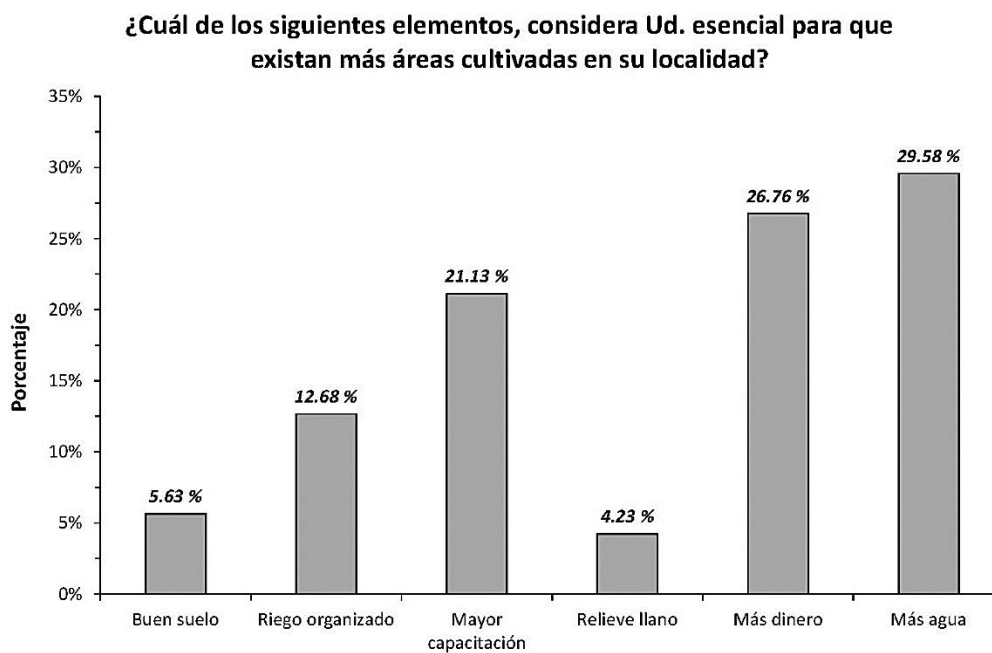
**¿Cómo encuentra Ud. el caudal del río Anya, en comparación con años anteriores?**



**Figura 155:** Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Anya - 3



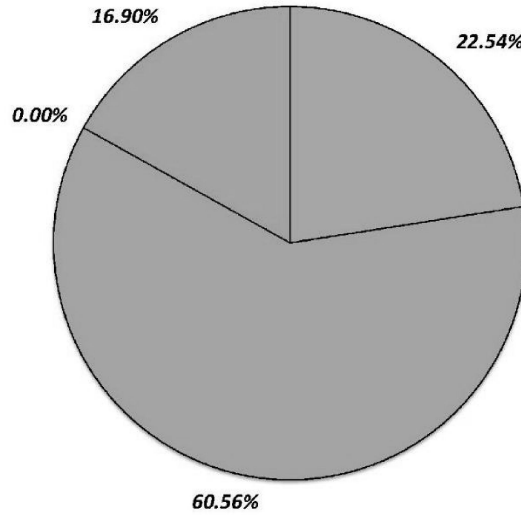
**Figura 156:** Eje sobre la cultura del agua en la cuenca Anya - 1



**Figura 157:** Eje sobre la cultura del agua en la cuenca Anya - 2

**¿Cuál es el principal uso que Ud. le da al agua?**

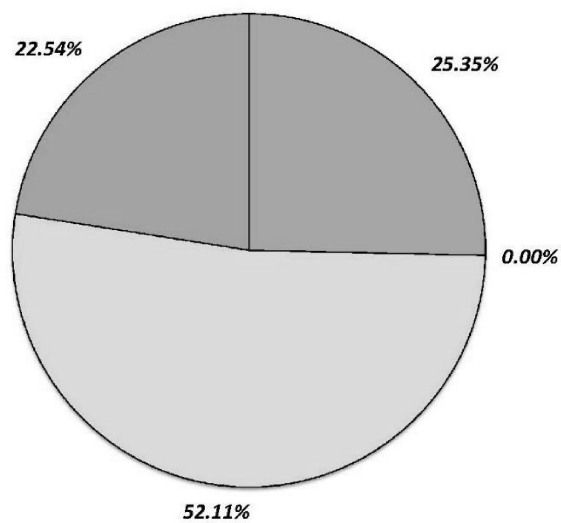
■ Para regar mis cultivos ■ Para uso doméstico ■ Para uso industrial ■ Para mis animales



**Figura 158:** Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Anya - 1

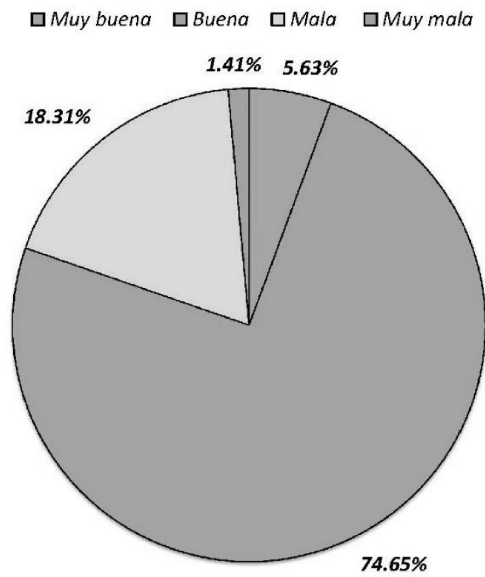
**¿Cómo Ud. riega sus cultivos?**

■ Riego por surcos ■ Riego presurizado ■ Riego por secano ■ No tengo cultivos



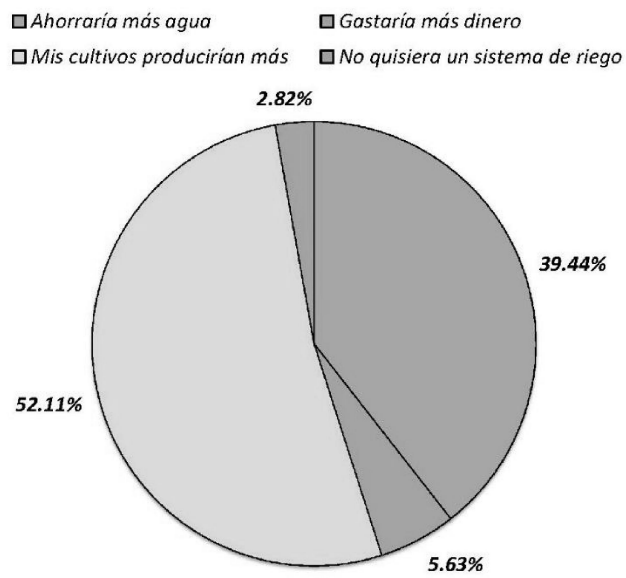
**Figura 159:** Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Anya - 2

**¿Cómo considera Ud. el abastecimiento de agua potable?**



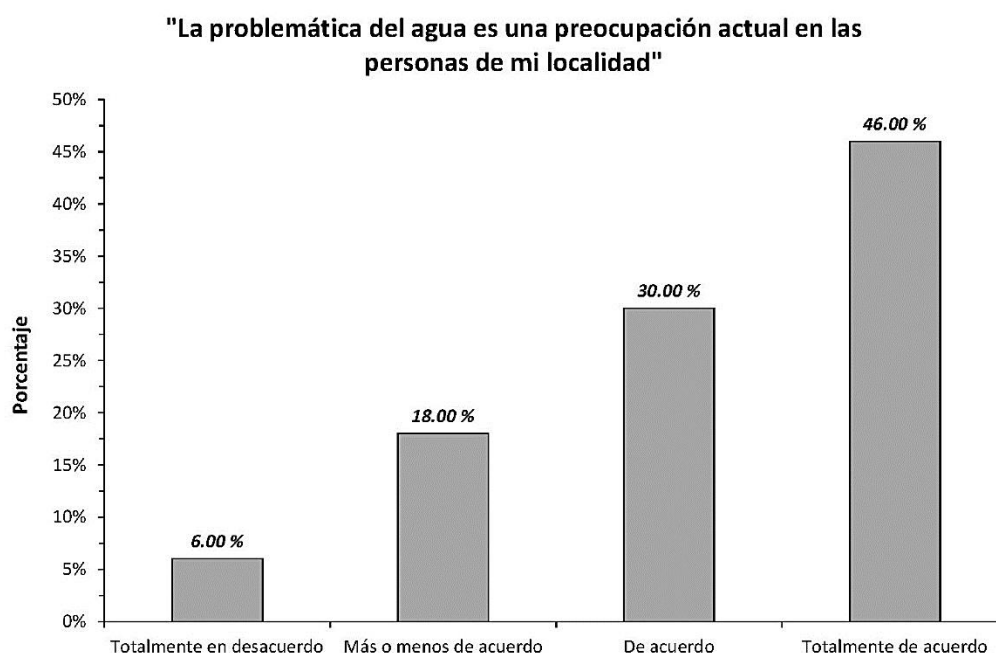
**Figura 160:** Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Anya - 3

**Si Ud. tuviera un sistema de riego tecnificado...**

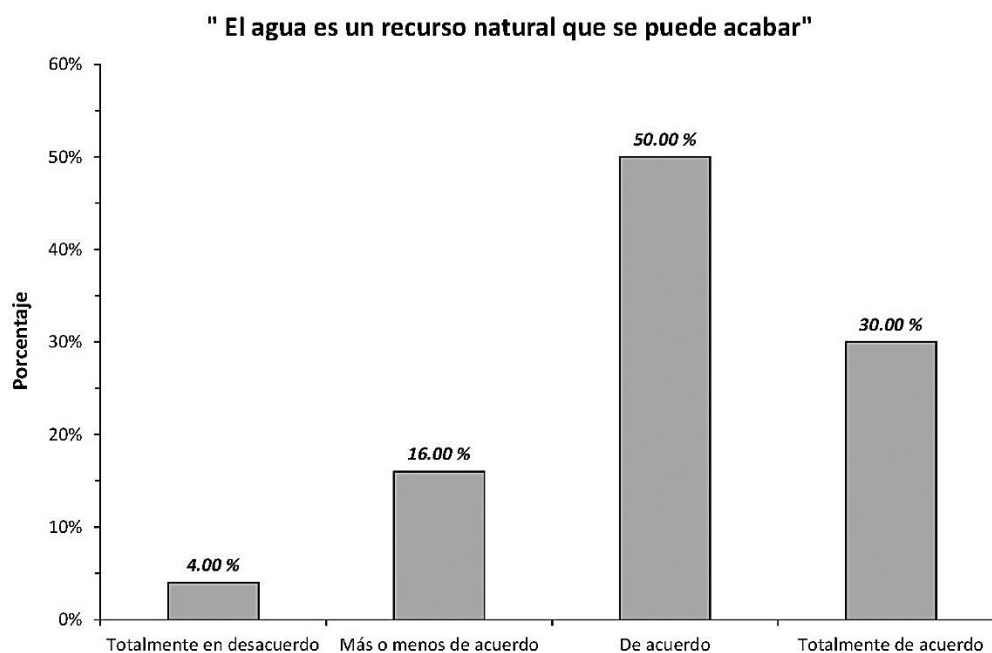


**Figura 161:** Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Anya - 4

## Anexo 4. 2: Caso de la cuenca Mchique

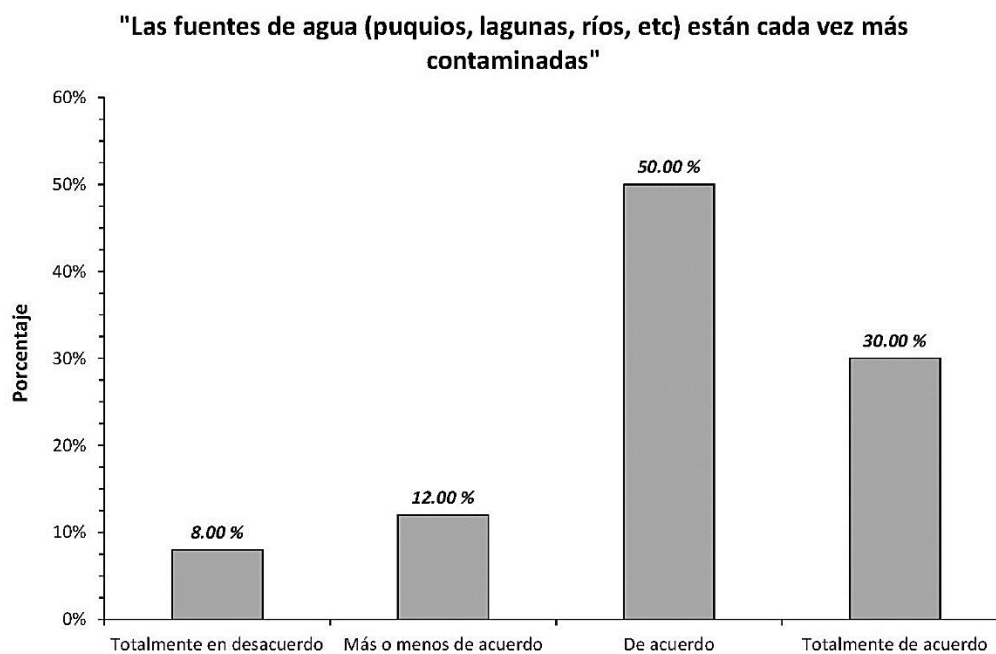


**Figura 162:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 1

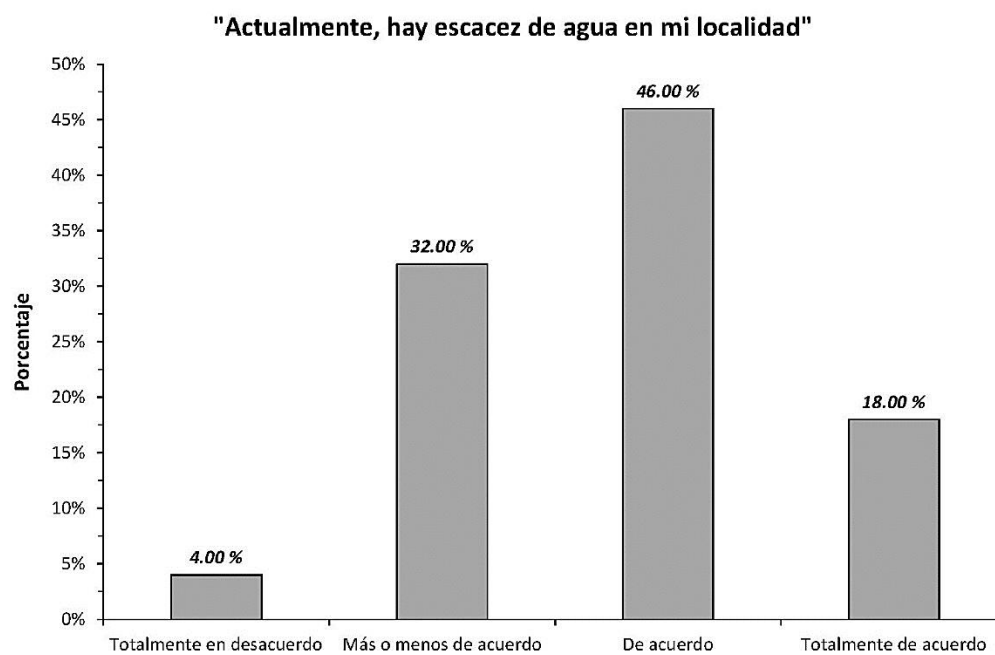


**Figura 163:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 2

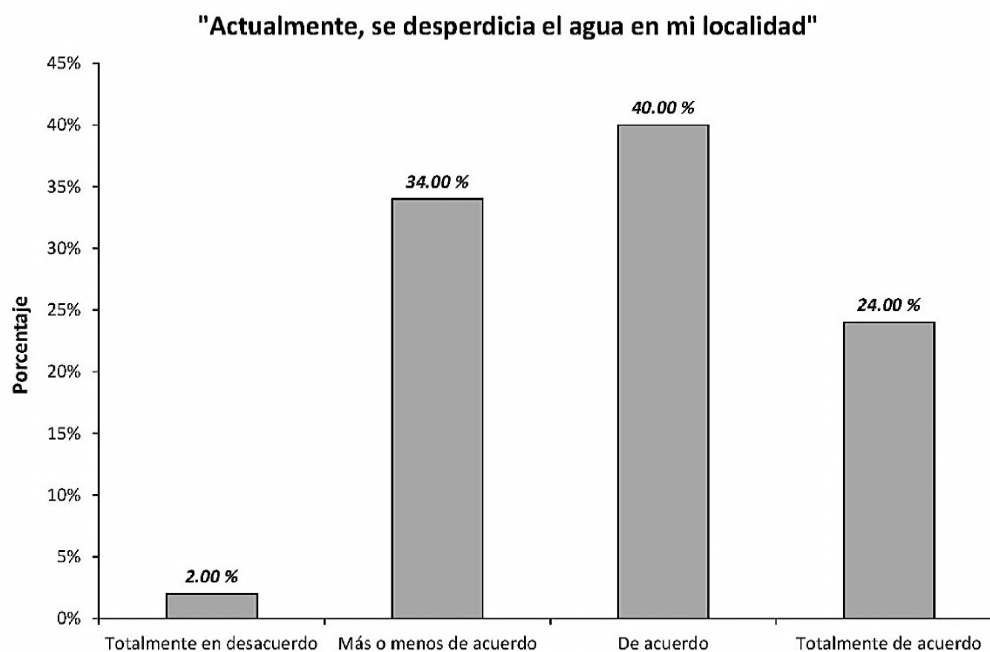




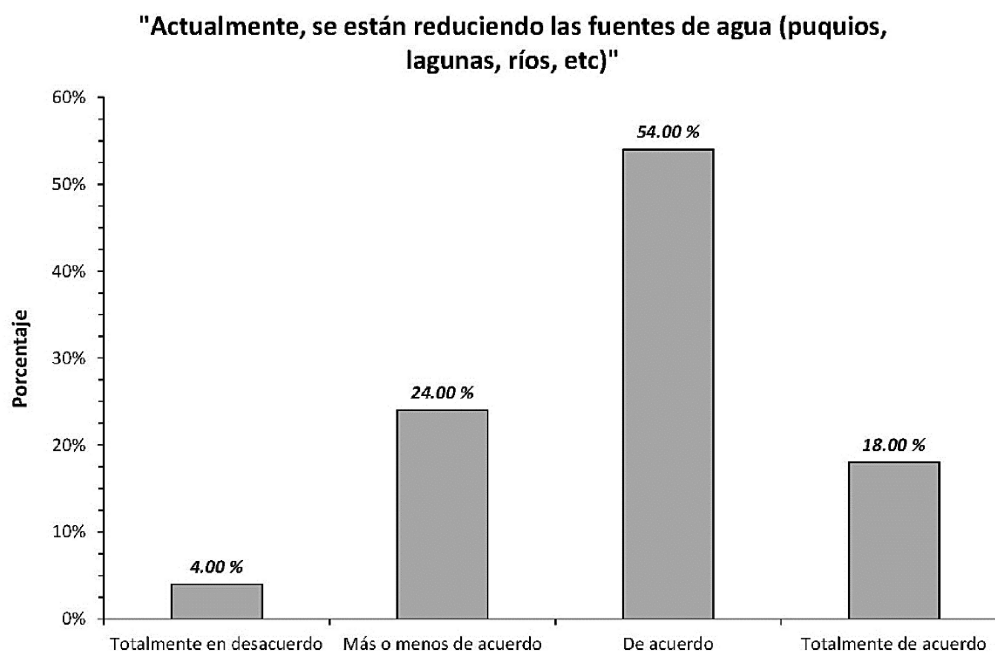
**Figura 164:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 3



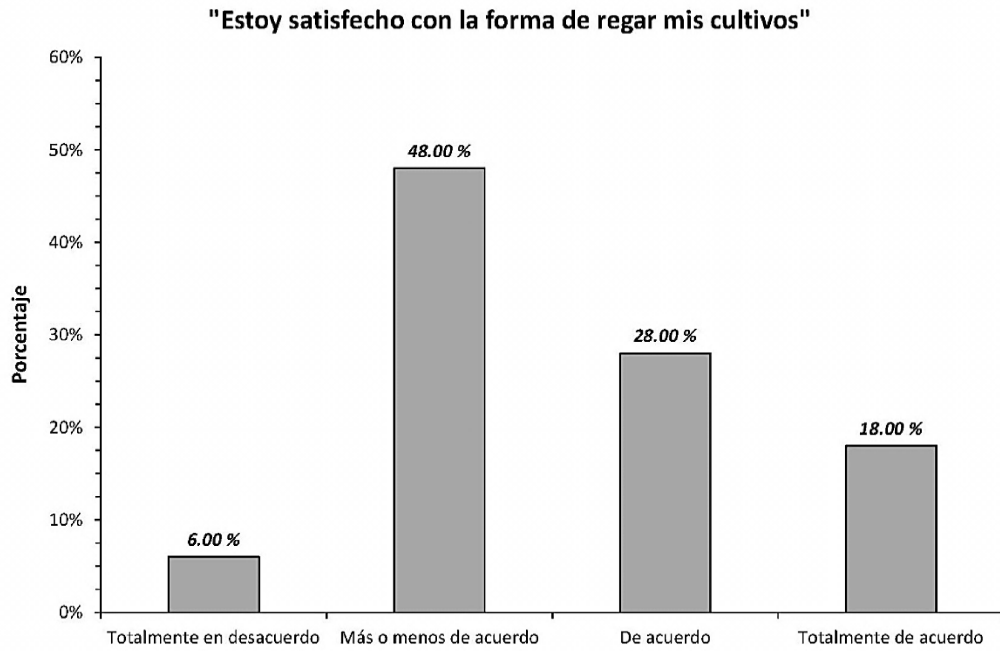
**Figura 165:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 4



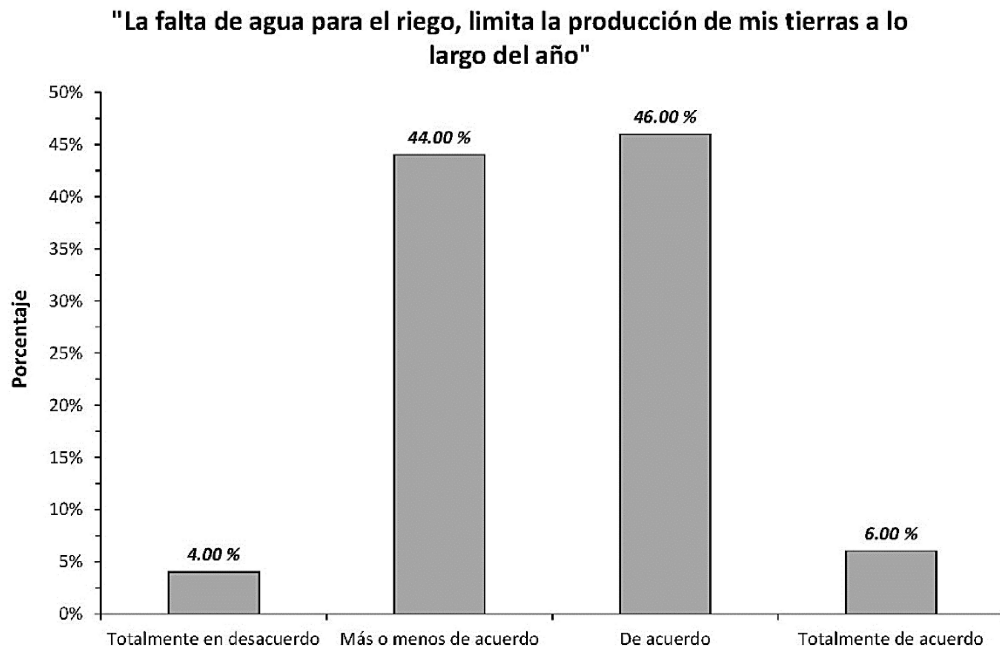
**Figura 166:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 5



**Figura 167:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 6

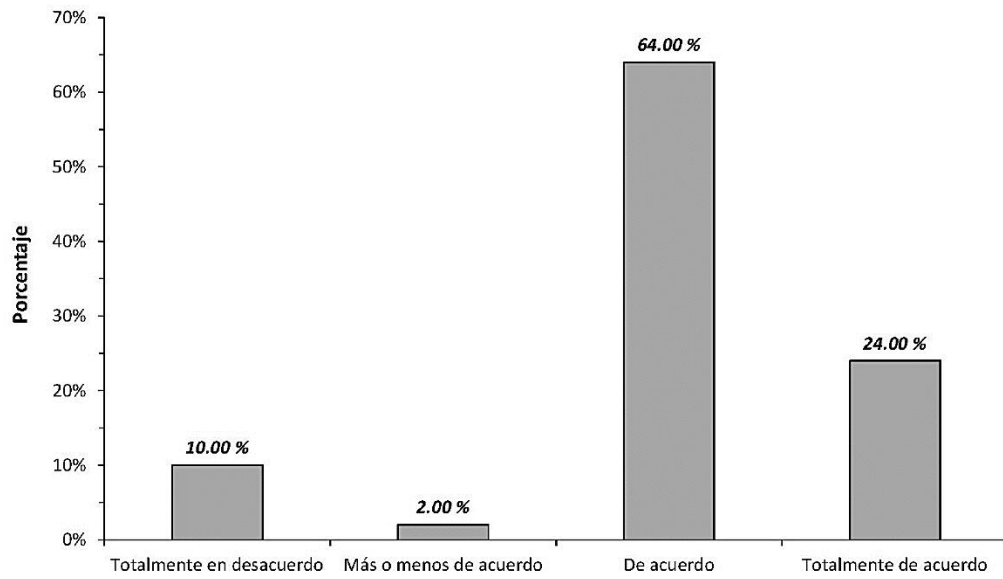


**Figura 168:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 7



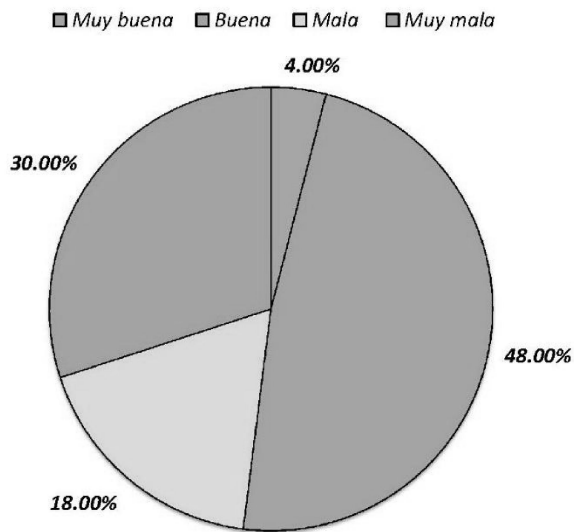
**Figura 169:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 8

**"Existe organización en la población, respecto al uso del agua con fines agrícolas"**



**Figura 170:** Eje sobre la problemática del agua en la cuenca Mchique - 9

**¿Cómo encuentras actualmente Ud. la calidad del agua del río Mchique?**



**Figura 171:** Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Mchique - 1

¿Cuál de las siguientes fuentes de agua, considera Ud. se encuentra en mal uso?

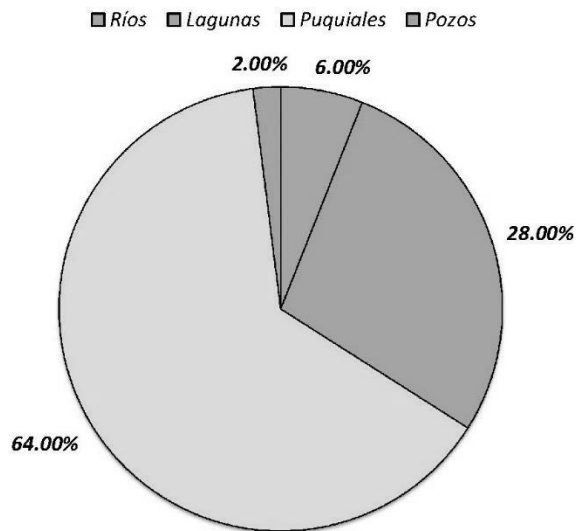


Figura 172: Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Mchique - 2

¿Cómo encuentra Ud. el caudal del río Mchique, en comparación con años anteriores?

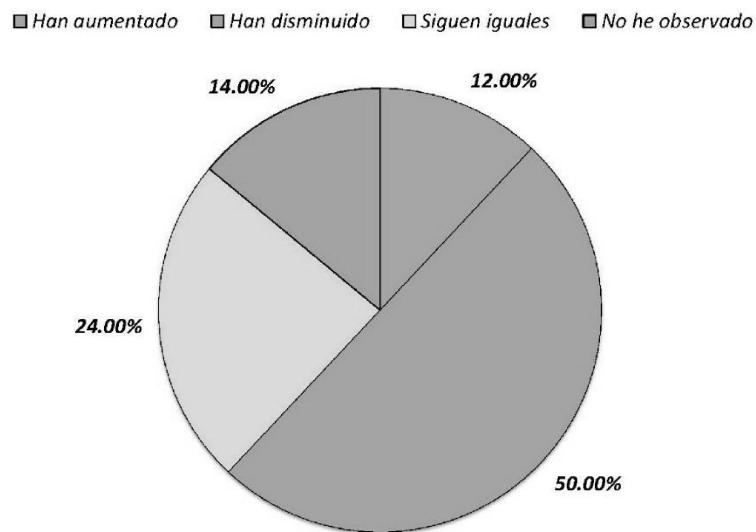


Figura 173: Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Mchique - 3

¿Cómo encuentra Ud. las lluvias en su localidad, en comparación con años anteriores?

■ Han aumentado ■ Han disminuido ■ Siguen iguales ■ No he observado

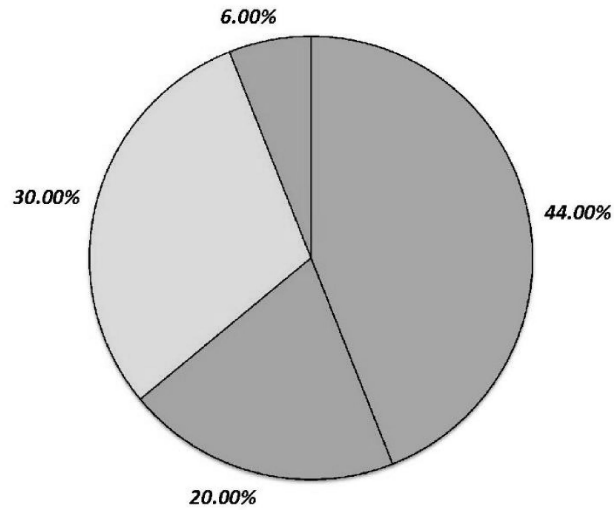


Figura 174: Eje sobre el agua y medio ambiente en la cuenca Mchique - 4

¿Qué significado tienen para Ud. los ríos y acequias de su localidad?

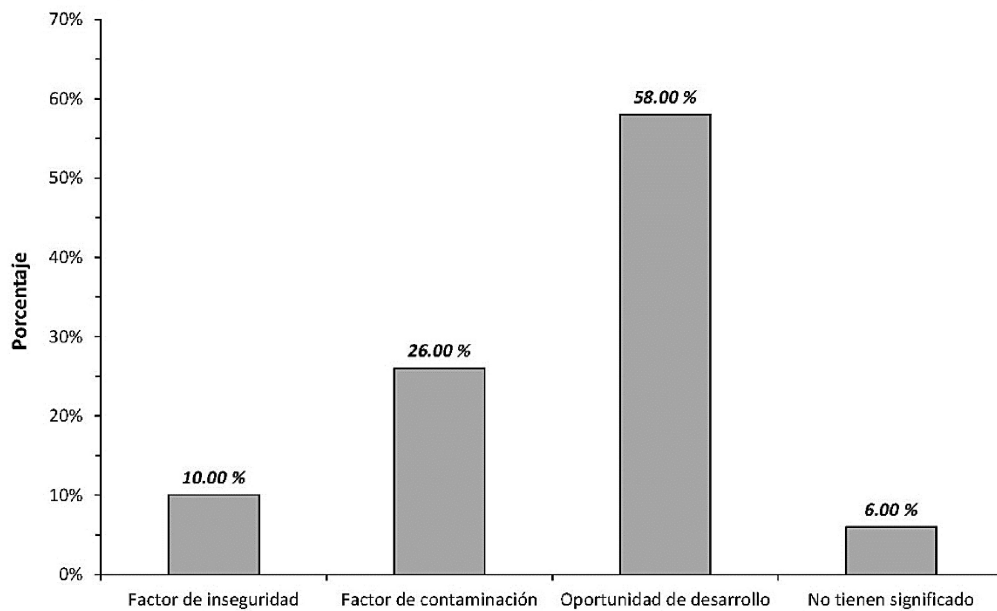
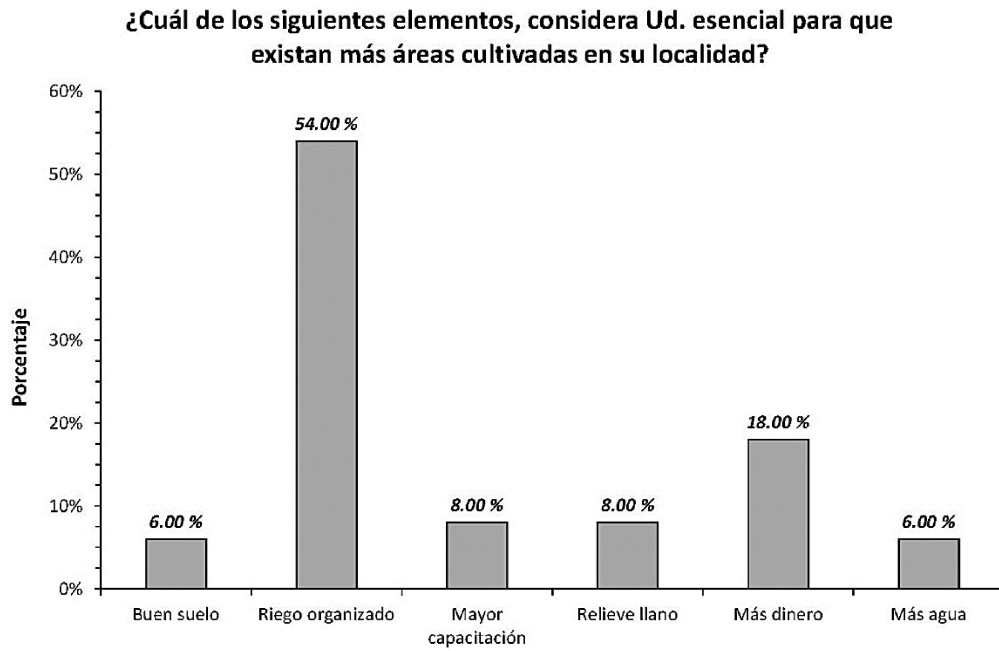
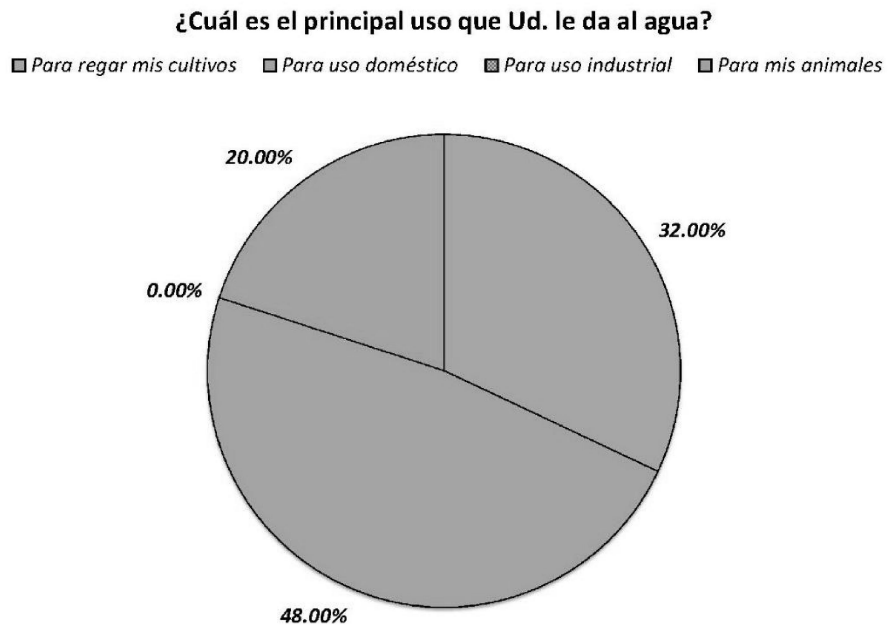


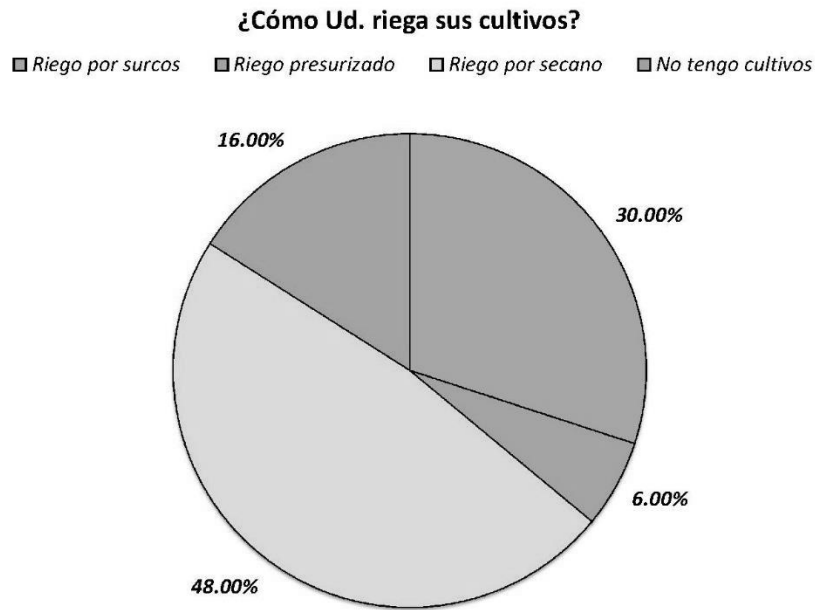
Figura 175: Eje sobre la cultura del agua en la cuenca Mchique - 1



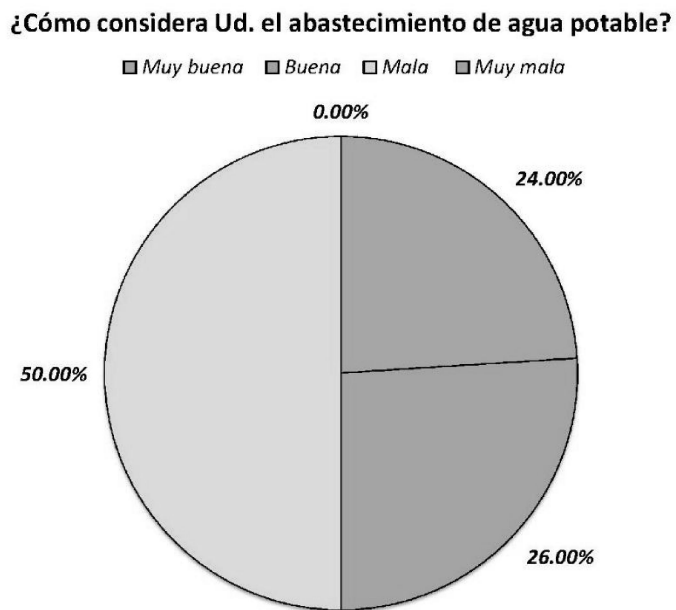
**Figura 176:** Eje sobre la cultura del agua en la cuenca Mchique - 2



**Figura 177:** Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Mchique - 1



**Figura 178:** Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Mchique - 2

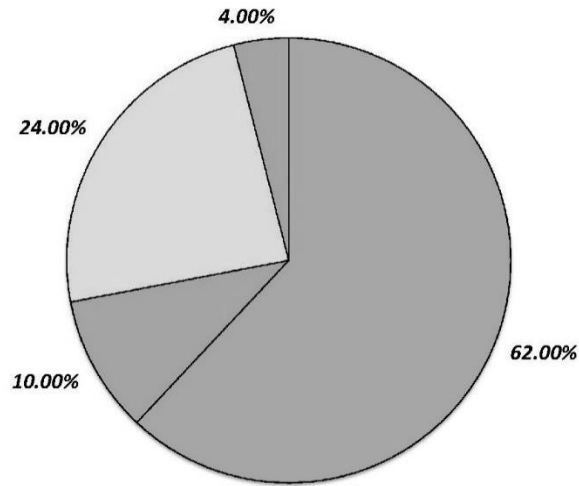


**Figura 179:** Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Mchique - 3



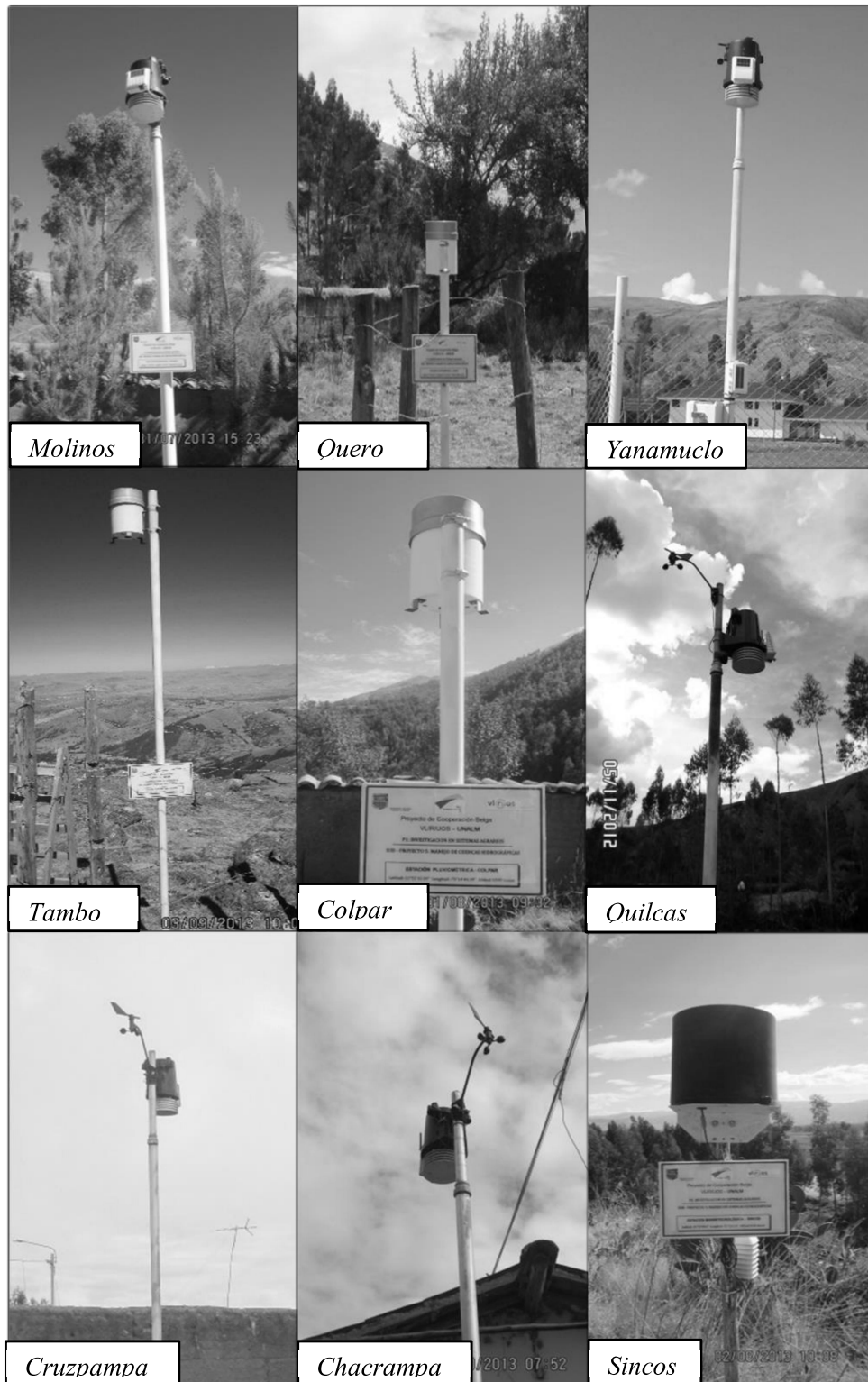
**Si Ud. tuviera un sistema de riego tecnificado...**

- Ahorraría más agua
- Gastaría más dinero
- Mis cultivos producirían más
- No quisiera un sistema de riego

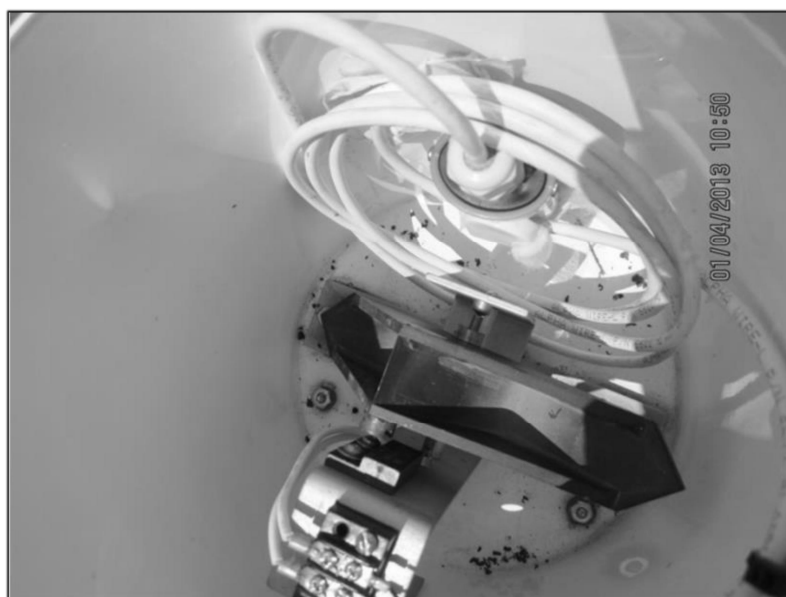


**Figura 180:** Eje sobre los hábitos de consumo de agua en la cuenca Mchique - 4

**Anexo 5: Panel fotográfico de actividades de campo**



**Foto 1:** 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 4:** Procedimiento de descarga de datos, estación pluviométrica Colpar



**Foto 5:** Procedimiento de descarga de datos, estación pluviométrica Quero



**Foto 6:** Procedimiento de descarga de datos pluviométricos



**Foto 7:** Estación meteorológica Cruzpampa



**Foto 8:** Descarga y configuración de estaciones pluviométricas



**Foto 9:** Procedimiento de aforo del río Anya



**Foto 10:** Procedimiento de aforo del río Mchique



**Foto 11:** Estación hidrométrica Anya



**Foto 12:** Estación hidrométrica Mchique



**Foto 13:** Mantenimiento del equipo Diver del río Mchique





**Foto 14:** Procedimiento de descarga de datos del equipo Diver del río Anya



**Foto 15:** Vistas de la cuenca Anya en (a) época húmeda y (b) época seca



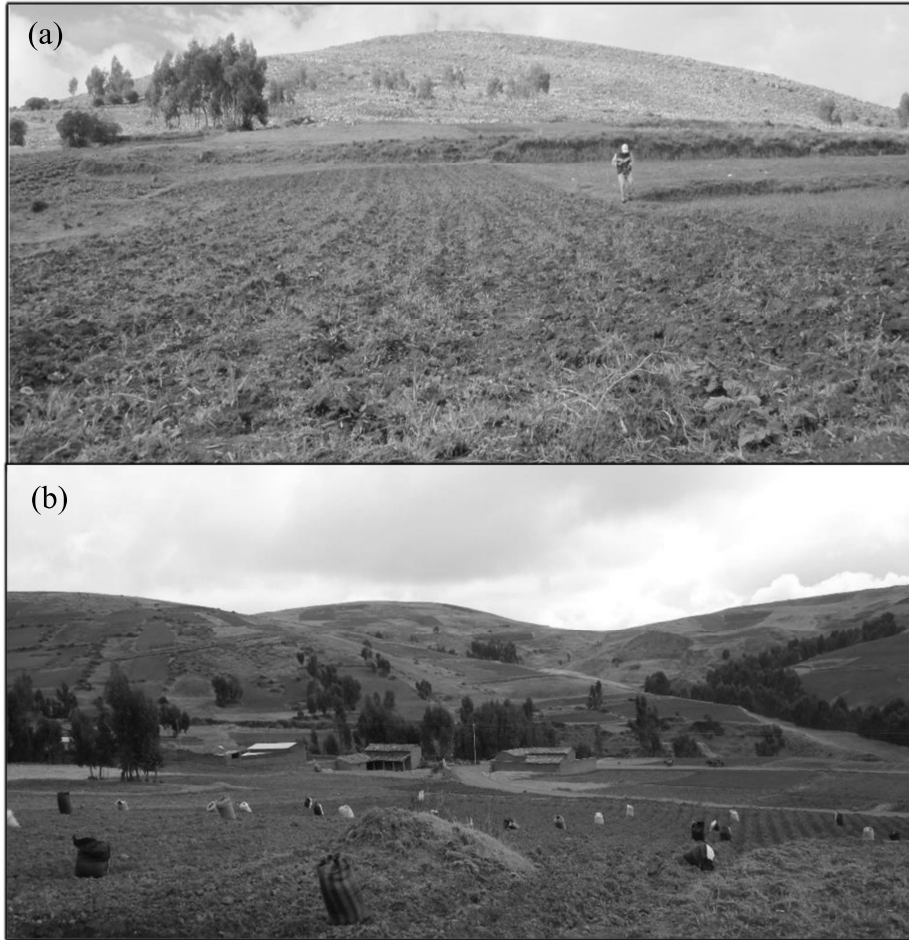
**Foto 16:** Vistas de la cuenca Mchique en (a) época húmeda y en (b) época seca



**Foto 17:** Vista panorámica del distrito de Quilcas



**Foto 18:** Vista panorámica del distrito de Sincos



**Foto 19:** (a) Siembra y (b) cosecha de papa en la cuenca Mchique



**Foto 20:** Cultivo de maíz en la cuenca Anya



**Foto 21:** Cultivo de papa y maíz en la cuenca Mchique



**Foto 22:** Estado de los canales de la cuenca Mchique



**Foto 23:** Toma rústica del canal de la cuenca Anya



**Foto 24:** Encuesta a la población de la cuenca Mchique, centro poblado de Aramachay



**Foto 25:** Encuesta de la población de la cuenca Anya, distrito de Quilcas

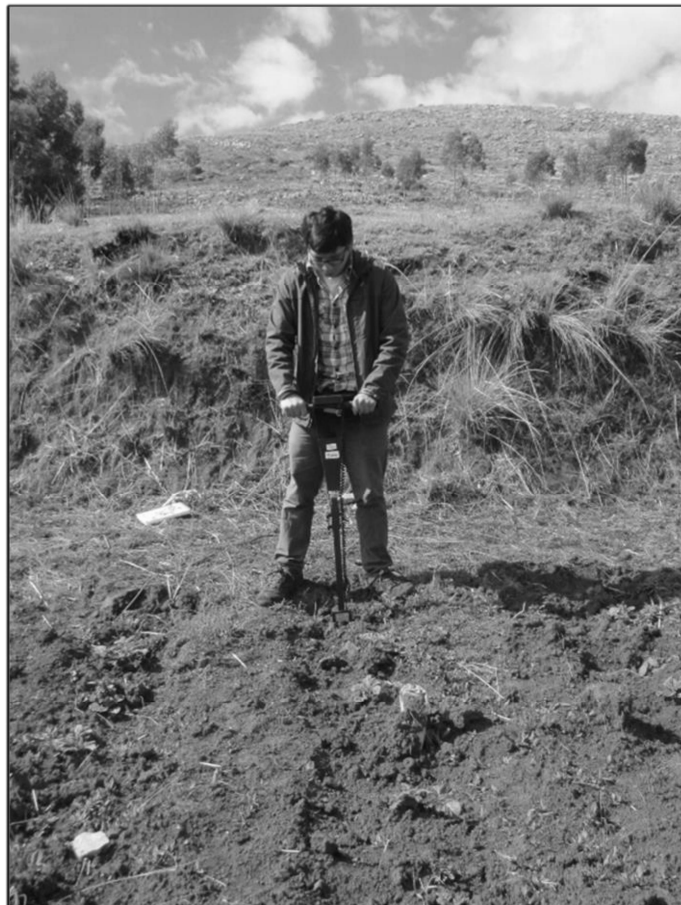


**Foto 26:** Problemas presentados en las labores de campo 1





**Foto 27:** Problemas presentados en las labores de campo 2



**Foto 28:** Medición de la humedad del suelo con el equipo TDR

## Anexo 6: Tablas en idioma original











Icon	Functionality	Data Requirements
 Reservoir [Operations]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Main-stem and offstream reservoir operations</li> <li>Flood control, conservation pools; dead storage</li> <li>Zones for storage balancing in multi-reservoir systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevation-area-capacity tables</li> <li>Maximum, minimum, initial storage</li> <li>Reservoir storage guidecurves</li> <li>Reservoir balance tables</li> <li>Hydraulic outlet capacity tables</li> <li>Net evaporation loss; seepage</li> <li>Inflow forecasts (if available)</li> </ul>
 Reservoir [Hydropower]	<ul style="list-style-type: none"> <li>High-head hydropower</li> <li>Run-of-river hydropower [0 storage]</li> <li>On-peak, secondary and firm energy</li> <li>Pumped storage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nonlinear efficiency tables as functions of head and discharge</li> <li>Tailwater-discharge tables</li> <li>Powerplant capacity</li> <li>Load factors for pumped storage</li> </ul>
 StorageRight Reservoir	<ul style="list-style-type: none"> <li>Storage right accounts</li> <li>Storage ownership maintenance</li> <li>Water banking and service contracts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Storage right users</li> <li>Group ownerships</li> </ul>
 NonStorage	<ul style="list-style-type: none"> <li>Watershed runoff</li> <li>Tributary inflow</li> <li>Flow confluence and diversion</li> <li>Groundwater return flows</li> <li>Stream depletion from pumping</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Imported inflow time series data</li> <li>Execution of external rainfall-runoff models through custom code</li> </ul>
 Demand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumptive demand</li> <li>Groundwater pumping</li> <li>Stream-aquifer modeling with Glover model or USGS stream depletion factor (sdf) method</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Import of demand time series data</li> <li>External consumptive use models</li> <li>Demands/priorities conditioned on hydrologic state</li> <li>Water use efficiency (time variable)</li> <li>Aquifer parameters; pumping capacity</li> </ul>
 Flowthru	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instream flow requirements environmental, ecological or navigation purposes</li> <li>Nonconsumptive demands</li> <li>Gaging station for model calibration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Time series of instream flow requirements</li> <li>Flow-through demands and priorities vary with hydrologic conditions</li> <li>Measured flow data for calibration</li> </ul>
 NetworkSink	<ul style="list-style-type: none"> <li>River basin outlet (multiple outlets for several basins allowed)</li> </ul>	
 Link	<ul style="list-style-type: none"> <li>Channel losses</li> <li>Maximum and Minimum Flow</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Time series of maximum capacities</li> <li>Link costs and benefits</li> </ul>
 MultiLink	<ul style="list-style-type: none"> <li>Represent nonlinear discharge-channel loss functions</li> <li>Nonlinear cost-discharge functions</li> <li>Multiple water sources and rights</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Time series of maximum capacities</li> <li>Link costs and benefits</li> </ul>
 Routing Link	<ul style="list-style-type: none"> <li>Streamflow and channel routing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muskingum method coefficients</li> <li>User defined lag coefficients</li> </ul>

Figura 181: Funcionabilidad y características de MODSIM (inglés)

## Anexo 7: Formato de encuestas sobre los recursos hídricos

### ENCUESTA SOBRE LA PROBLEMÁTICA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA ANYA

La presente encuesta tiene por finalidad, recoger información relacionada a la percepción que tienen los pobladores de la cuenca del río Anya, frente a la problemática de los recursos hídricos de la zona; en el marco del "Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas del Anya y del Mchique, departamento de Junín - Perú".

#### a.- DATOS GENERALES

<p>Edad</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <input type="checkbox"/> 18 - 25 años  <input checked="" type="checkbox"/> 26 - 35 años  <input type="checkbox"/> 36 - 45 años  <input type="checkbox"/> 45 - más         </div> <p>Sexo</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <input type="checkbox"/> Femenino  <input type="checkbox"/> Masculino         </div>	<p>Croquis - Centro Poblado</p> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div>
---	--

#### b.- EJE N° 01: VISIBILIDAD DE LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA

	Totalmente en desacuerdo	Más o menos de acuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
La problemática del agua es una preocupación actual en las personas de tu localidad.				
El agua es un recurso natural que se puede acabar.				
Las fuentes de agua (puquios lagunas, ríos, etc) están cada vez más contaminadas.				
Actualmente hay escasez de agua en mi localidad.				
Actualmente se desperdicia el agua en mi localidad.				
Actualmente se están reduciendo las fuentes de agua como: puquios, lagunas, ríos, etc.				
Estoy satisfecho con la forma de regar mis cultivos.				
La falta de agua para riego limita la producción de mis tierras a lo largo del año.				
Existe organización en la población respecto al uso del agua con fines agrícolas.				

#### c.- EJES N° 02: AGUA Y MEDIO AMBIENTE

¿Cómo encuentra actualmente Ud. la calidad del agua del río Anya?

Muy buena   
  Buena   
  Mala   
  Muy mala

¿Cuál de las siguientes fuentes de agua considera Ud. se encuentra en mal uso?

Ríos   
  Lagunas   
  Puquiales   
  Pozos

¿Cómo encuentra Ud. el caudal del río Anya, en comparación con años anteriores?

Han aumentado   
  Han disminuido   
  Siguen iguales   
  No he observado

## ENCUESTA SOBRE LA PROBLEMÁTICA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA ANYA

¿Cómo encuentra Ud. las lluvias en su localidad, en comparación con años anteriores?

- Han aumentado     Han disminuido     Siguen iguales     No he observado

Según Ud. ¿En qué meses del año se presentan fuertes lluvias?

### d.- EJE N°03: CULTURA DEL AGUA

¿Qué significado tienen para Ud. los ríos y acequias en su localidad?

- Factor de inseguridad     Factor de contaminación  
 Oportunidad de desarrollo     No tienen significado

¿Cuál de estos elementos es esencial para que existan más áreas cultivadas en su localidad?

- Buen suelo     Riego organizado     Mayor capacitación  
 Relieve Llano     Más dinero     Más agua

### d.- EJE 04: HABITOS DE CONSUMO

¿Cuál es el principal uso que Ud. le da al agua?

- Para regar mis cultivos  
 Para uso doméstico  
 Para uso industrial  
 Para mis animales

¿Cómo Ud. riega sus cultivos?

- Riego por surcos  
 Riego presurizado  
 Riego por secano (lluvia)  
 No tengo cultivos

¿Cómo considera el abastecimiento de agua potable?

- Muy bueno  
 Bueno  
 Malo  
 Muy malo

Si Ud. tuviera un sistema de riego tecnificado...

- Ahorraría más agua  
 Gastaría más dinero  
 Mis cultivos producirían más  
 No quisiera un sistema de riego

### e.- PLANTEAMIENTOS

¿Qué cultivos rentables se podría cultivar al incrementarse las áreas agrícolas?

¿Estaría Ud. de acuerdo con la construcción de reservorios y canales para incrementar las áreas cultivables?

- SI     NO

¿Estaría Ud. de acuerdo con la creación de una junta de regantes?

- SI     NO

### f.- DÉJANOS TU OPINIÓN

---

---

---

**ENCUESTA SOBRE LA PROBLEMÁTICA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA MCHIQUE**

La presente encuesta tiene por finalidad, recoger información relacionada a la percepción que tienen los pobladores de la cuenca del río Mchique, frente a la problemática de los recursos hídricos de la zona; en el marco del "Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas del Anya y del Mchique, departamento de Junín - Perú".

**a.- DATOS GENERALES**

<p>Edad</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <input type="checkbox"/> 18 - 25 años  <input type="checkbox"/> 26 - 35 años  <input type="checkbox"/> 36 - 45 años  <input type="checkbox"/> 45 - más         </div> <p>Sexo</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <input type="checkbox"/> Femenino  <input type="checkbox"/> Masculino         </div>	<p>Croquis - Centro Poblado</p> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div>
--	--

**b.- EJE N° 01: VISIBILIDAD DE LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA**

	Totalmente en desacuerdo	Más o menos de acuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
La problemática del agua es una preocupación actual en las personas de tu localidad.				
El agua es un recurso natural que se puede acabar.				
Las fuentes de agua (puquios lagunas, ríos, etc) están cada vez más contaminadas.				
Actualmente hay escasez de agua en mi localidad.				
Actualmente se desperdicia el agua en mi localidad.				
Actualmente se están reduciendo las fuentes de agua como: puquios, lagunas, ríos, etc.				
Estoy satisfecho con la forma de regar mis cultivos.				
La falta de agua para riego limita la producción de mis tierras a lo largo del año.				
Existe organización en la población respecto al uso del agua con fines agrícolas.				

**c.- EJES N° 02: AGUA Y MEDIO AMBIENTE**

¿Cómo encuentra actualmente Ud. la calidad del agua del río Mchique?

Muy buena   
  Buena   
  Mala   
  Muy mala

¿Cuál de las siguientes fuentes de agua considera Ud. se encuentra mal usada?

Ríos   
  Lagunas   
  Puquiales   
  Pozos

¿Cómo encuentra el caudal del río Mchique, en comparación con años anteriores?

Han aumentado   
  Han disminuido   
  Siguen iguales   
  No he observado

**ENCUESTA SOBRE LA PROBLEMÁTICA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA MCHIQUE**

¿Cómo encuentra las lluvias en su localidad, en comparación con años anteriores?

Han aumentado     Han disminuido     Siguen iguales     No he observado

Según Ud. ¿En qué meses del año se presentan fuertes lluvias?

\_\_\_\_\_

**d.- EJE N°03: CULTURA DEL AGUA**

¿Qué significado tienen para Ud. los ríos y acequias en su localidad?

Factor de inseguridad     Factor de contaminación  
 Oportunidad de desarrollo     No tienen significado

¿Cuál de estos elementos es esencial para que existan más áreas cultivadas en su localidad?

Buen suelo     Riego organizado     Mayor capacitación  
 Relieve Llano     Más dinero     Más agua

**d.- EJE 04: HABITOS DE CONSUMO**

¿Cuál es el principal uso que Ud. le da al agua?

Para regar mis cultivos  
 Para uso doméstico  
 Para uso industrial  
 Para mis animales

¿Cómo Ud. riega sus cultivos?

Riego por surcos  
 Riego presurizado  
 Riego por secano (lluvia)  
 No tengo cultivos

¿Cómo considera el abastecimiento de agua potable?

Muy bueno  
 Bueno  
 Malo  
 Muy malo

Si Ud. tuviera un sistema de riego tecnificado...

Ahorraría más agua  
 Gastaría más dinero  
 Mis cultivos producirían más  
 No quisiera un sistema de riego

**e.- PLANTEAMIENTOS**

¿Qué cultivos rentables se podría cultivar al incrementarse las áreas agrícolas? \_\_\_\_\_

¿Estaría Ud. de acuerdo con la construcción de reservorios y canales para incrementar las áreas cultivables?     SI     NO

¿Estaría Ud. de acuerdo con la creación de una junta de regantes?     SI     NO

**f.- DÉJANOS TU OPINIÓN**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## Anexo 8: Protocolo de uso de programas

### Anexo 8.1: Protocolo de uso de Hec-HMS 3.5

# I. SOIL MOISTURE ACCOUNTING LOSS

## A. METHOD

The soil moisture accounting loss method uses three layers to represent the dynamics of water movement in the soil. It is often used in conjunction with a canopy and surface method. Layers within the method include soil storage, upper groundwater, and lower groundwater. The soil layer is subdivided into tension storage and gravity storage. Groundwater layers are not designed to represent aquifer processes; they are intended to be used for representing shallow interflow processes. The method provides for wetting and recovery cycles and can be used for long periods of continuous simulation.

Parameter	Value
*Soil (%)	67
*Groundwater 1 (%)	50
*Groundwater 2 (%)	82
*Max Infiltration (MM/HR)	53
*Impervious (%)	0.0
*Soil Storage (MM)	240
*Tension Storage (MM)	206
*Soil Percolation (MM/HR)	4
*GW 1 Storage (MM)	250
*GW 1 Percolation (MM/HR)	1.2
*GW 1 Coefficient (HR)	120

*Soil moisture accounting loss method editor.*

The initial condition of the soil should be specified as the percentage of the soil that is full of water at the beginning of the simulation. The initial condition of the upper and lower groundwater layers must also be specified.

The maximum infiltration rate sets the upper bound on infiltration from the surface storage into the soil. This is the upper bound on infiltration; the actual infiltration in a particular time interval is a linear function of the surface and soil storage in the cell, if a surface method is selected. Without a selected surface method, water will always infiltrate at the maximum rate.

The percentage of the subbasin which is directly connected impervious area can be specified. All precipitation on that portion of the subbasin becomes excess precipitation and subject to direct runoff.

Soil storage represents the total storage available in the soil layer. It may be zero if you wish to eliminate soil calculations and pass infiltrated water directly to groundwater.

Tension storage specifies the amount of water storage in the soil that does not drain under the affects of gravity. Percolation from the soil layer to the upper groundwater layer will occur whenever the current soil storage exceeds the tension storage. Water in tension storage is only removed by evapotranspiration. By definition, tension storage must be less that soil storage.

The soil percolation sets the upper bound on percolation from the soil storage into the upper groundwater. The actual percolation rate is a linear function of the current storage in the soil and the current storage in the upper groundwater.

Groundwater 1 storage represents the total storage in the upper groundwater layer. It may be zero if you wish to eliminate the upper groundwater layer and pass water percolated from the soil directly to the lower groundwater layer.

The groundwater 1 percolation rate sets the upper bound on percolation from the upper groundwater into the lower groundwater. The actual percolation rate is a linear function of the current storage in the upper and lower groundwater layers.

The groundwater 1 coefficient is used as the time lag on a linear reservoir for transforming water in storage to become lateral outflow. The lateral outflow is available to become baseflow.

Groundwater 2 storage represents the total storage in the lower groundwater layer. It may be zero if you wish to eliminate the lower groundwater layer and pass water percolated from the upper groundwater layer directly to deep percolation.

The groundwater 2 percolation rate sets the upper bound on deep percolation out of the system. The actual percolation rate is a linear function of the current storage in the lower groundwater layer.

The groundwater 2 coefficient is used as the time lag on a linear reservoir for transforming water in storage to become lateral outflow. It is usually a larger value that the groundwater 1 coefficient. The lateral outflow is likewise available to become baseflow.

## B. STORAGE COMPONENT

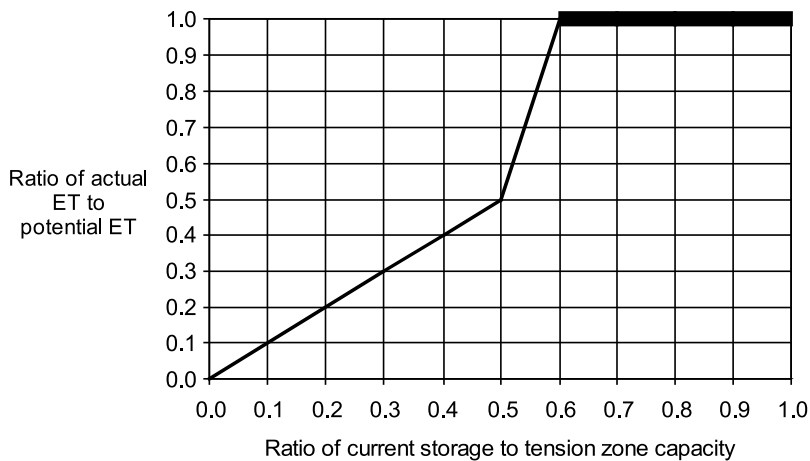
The SMA model represents the watershed with a series of storage layers, as illustrated by Figure 14. Rates of inflow to, outflow from, and capacities of the layers control the volume of water lost or added to each of these storage components. Current storage contents are calculated during the simulation and vary continuously both during and between storms. The different storage layers in the SMA model are:

- **Canopy-interception storage.** Canopy interception represents precipitation that is captured on trees, shrubs, and grasses, and does not reach the soil surface. Precipitation is the only inflow into this layer. When precipitation occurs, it first fills canopy storage. Only after this storage is filled does precipitation become available for filling other storage volumes. Water in canopy interception storage is held until it is removed by evaporation.
- **Surface-interception storage.** Surface depression storage is the volume of water held in shallow surface depressions. Inflows to this storage come from precipitation not captured by canopy interception and in excess of the infiltration rate. Outflows from this storage can be due to infiltration and to ET. Any contents in surface depression storage at the



beginning of the time step are available for infiltration. If the water available for infiltration exceeds the infiltration rate, surface interception storage is filled. Once the volume of surface interception is exceeded, this excess water contributes to surface runoff.

- Soil-profile storage.** The soil profile storage represents water stored in the top layer of the soil. Inflow is infiltration from the surface. Outflows include percolation to a groundwater layer and ET. The soil profile zone is divided into two regions, the *upper zone* and the *tension zone*. The upper zone is defined as the portion of the soil profile that will lose water to ET and/or percolation. The tension zone is defined as the area that will lose water to ET only. The upper zone represents water held in the pores of the soil. The tension zone represents water attached to soil particles. ET occurs from the upper zone first and tension zone last. Furthermore, ET is reduced below the potential rate occurring from the tension zone, as shown in Figure 15. This represents the natural increasing resistance in removing water attached to soil particles. ET can also be limited to the volume available in the upper zone during specified winter months, depicting the end of transpiration by annual plants.



*ET as a function of tension zone storage (Bennett, 1998)*

- Groundwater storage.** Groundwater layers in the SMA represent horizontal interflow processes. The SMA model can include either one or two such layers. Water percolates into groundwater storage from the soil profile. The percolation rate is a function of a user-specified maximum percolation rate and the current storage in the layers between which the water flows. Losses from a groundwater storage layer are due to *groundwater flow* or to percolation from one layer to another. Percolation from the soil profile enters the first layer. Stored water can then percolate from layer 1 to groundwater layer 2 or from groundwater layer 2 to deep percolation. In the latter case, this water is considered lost from the system; aquifer flow is not modeled in the SMA.

## C. FLOW COMPONENT

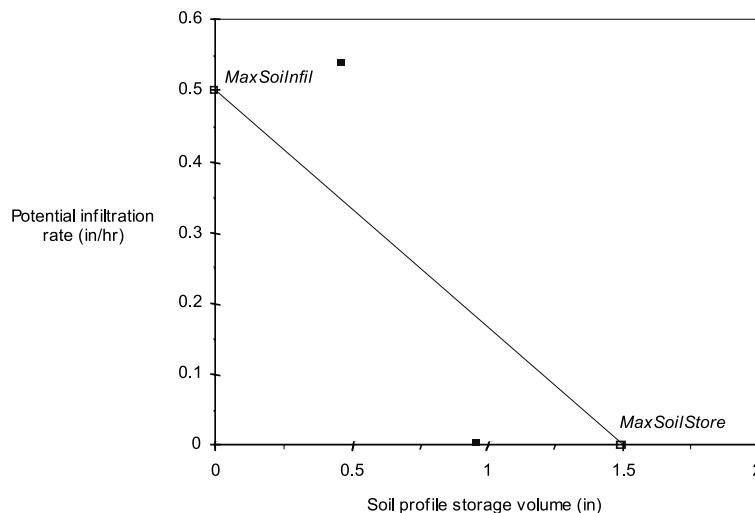
The SMA model computes flow into, out of, and between the storage volumes. This flow can take the form of:

- **Precipitation.** Precipitation is an input to the system of storages. Precipitation first contributes to the canopy interception storage. If the canopy storage fills, the excess amount is then available for infiltration.
- **Infiltration.** Infiltration is water that enters the soil profile from the ground surface. Water available for infiltration during a time step comes from precipitation that passes through canopy interception, plus water already in surface storage.

The volume of infiltration during a time interval is a function of the volume of water available for infiltration, the state (fraction of capacity) of the soil profile, and the maximum infiltration rate specified by the model user. For each interval in the analysis, the SMA model computes the potential infiltration volume, *PotSoilInfl*, as:

$$PotSoilInfl = MaxSoilInfl - \frac{CurSoilStore}{MaxSoilStore} MaxSoilInfl$$

where *MaxSoilInfl* = the maximum infiltration rate; *CurSoilStore* = the volume in the soil storage at the beginning of the time step; and *MaxSoilStore* = the maximum volume of the soil storage. The actual infiltration rate, *ActInfl*, is the minimum of *PotSoilInfl* and the volume of water available for infiltration. If the water available for infiltration exceeds this calculated infiltration rate, the excess then contributes to surface interception storage.



*Potential infiltration rate versus beginning of time step soil profile storage.*

Figure 16 illustrates the relationship of these, using an example with *MaxSoilInfl* = 0.5 in/hr and *MaxSoilStore* = 1.5 in. As illustrated, when the soil profile storage is empty, potential infiltration equals the maximum infiltration rate, and when the soil profile is full, potential infiltration is zero.

- **Percolation.** Percolation is the movement of water downward from the soil profile, through the groundwater layers, and into a deep aquifer.

In the SMA model, the rate of percolation between the soil-profile storage and a groundwater layer or between two groundwater layers depends on the volume in the source and receiving layers. The rate is greatest when the source layer is nearly full and the receiving layer is nearly empty. Conversely, when the receiving layer is nearly full and the source layer is nearly empty, the percolation rate is less. In the SMA model, the percolation rate from the soil profile into groundwater layer 1 is computed as:

$$PotSoilPerc = MaxSoilPerc \left( \frac{CurSoilStore}{MaxSoilStore} \right) \left( 1 - \frac{CurGwStore}{MaxGwStore} \right)$$

where *PotSoilPerc* = the potential soil percolation rate; *MaxSoilPerc* = a user-specified maximum percolation rate; *CurSoilStore* = the calculated soil storage at the beginning of the time step; *MaxSoilStore* = a user-specified maximum storage for the soil profile; *CurGwStore* = the calculated groundwater storage for the upper groundwater layer at the beginning of the time step; and *MaxGwStore* = a user-specified maximum groundwater storage for groundwater layer 1.

The potential percolation rate computed with Equation 22 is multiplied by the time step to compute a potential percolation volume. The available water for percolation is equal the initial soil storage plus infiltration. The minimum of the potential volume and the available volume percolates to groundwater layer 1.

A similar equation is used to compute *PotGwPerc*, the potential percolation from groundwater layer 1 to layer 2:

$$PotGwPerc = MaxPercGw \left( \frac{CurGwStore}{MaxGwStore} \right) \left( 1 - \frac{CurGwStore}{MaxGwStore} \right)$$

where *MaxPercGw* = a user-specified maximum percolation rate; *CurGwStore* = the calculated groundwater storage for the groundwater layer 2; and *MaxGwStore* = a user-specified maximum groundwater storage for layer 2. The actual volume of percolation is computed as described above.

For percolation directly from the soil profile to the deep aquifer in the absence of groundwater layers, for percolation from layer 1 when layer 2 is not used, or percolation from layer 2, the rate depends only on the storage volume in the source layer. In those cases, percolation rates are computed as

$$PotSoilPerc = MaxSoilPerc \frac{CurSoilStore}{MaxSoilStore}$$

and

$$PotGwPerc = MaxPercGw \frac{CurGwStore}{MaxGwStore}$$

respectively, and actual percolation volumes are computed as described above.

- **Surface runoff and groundwater flow.** Surface runoff is the water that exceeds the infiltration rate and overflows the surface storage. This volume of water is direct runoff; the resulting runoff hydrograph is computed with one of the models described in Chapter 6.

Groundwater flow is the sum of the volumes of groundwater flow from each groundwater layer at the end of the time interval. The rate of flow is computed as:

$$GwFlow_{t+1} = \frac{ActSoilPerc + CurGw_iStore - PotGw_iPerc - \frac{1}{2}GwFlow_t \cdot TimeStep}{RoutGw_iStore + \frac{1}{2}TimeStep}$$

where  $GwFlow_t$  and  $GwFlow_{t+1}$  = groundwater flow rate at beginning of the time interval  $t$  and  $t+1$ , respectively;  $ActSoilPerc$  = actual percolation from the soil profile to the groundwater layer;  $PotGw_iPerc$  = potential percolation from groundwater layer  $i$ ;  $RoutGw_iStore$  = groundwater flow routing coefficient from groundwater storage  $i$ ;  $TimeStep$  = the simulation time step; and other terms are as defined previously. The volume of groundwater flow that the watershed releases,  $GwVolume$ , is the integral of the rate over the model time interval. This is computed as

$$GwVolume = \frac{1}{2}(GwFlow_{t+1} + GwFlow_t) \cdot TimeStep$$

This volume may be treated as inflow to a linear reservoir model to simulate baseflow, as described in Chapter 7.

- **Evapotranspiration (ET).** ET is the loss of water from the canopy interception, surface depression, and soil profile storages. In the SMA model, potential ET demand currently is computed from monthly pan evaporation depths, multiplied by monthly-varying pan correction coefficients, and scaled to the time interval.

The potential ET volume is satisfied first from canopy interception, then from surface interception, and finally from the soil profile. Within the soil profile, potential ET is first fulfilled from the upper zone, then the tension zone. If potential ET is not completely satisfied from one storage in a time interval, the unsatisfied potential ET volume is filled from the next available storage.

When ET is from interception storage, surface storage, or the upper zone of the soil profile, actual ET is equivalent to potential ET. When potential ET is drawn from the tension zone, the actual ET is a percentage of the potential, computed as:

$$ActEvapSoil = PotEvapSoil \cdot f(CurSoilStore, MaxTenStore)$$

where  $ActEvapSoil$  = the calculated ET from soil storage;  $PotEvapSoil$  = the calculated maximum potential ET; and  $MaxTenStore$  = the user specified maximum storage in the tension zone of soil storage. The function,  $f(\bullet)$ , in Equation 28 is defined as follows:

- As long as the current storage in the soil profile exceeds the maximum tension zone storage ( $CurSoilStore/MaxTenStore > 1$ ), water is removed from the upper zone at a one-to-one rate, the same as losses from canopy and surface interception.
- Once the volume of water in the soil profile zone reaches the tension zone,  $f(\bullet)$  is determined similar to percolation. This represents the decreasing rate of ET loss from the soil profile as the amount of water in storage (and therefore the capillary force) decreases, as illustrated in Figure 15.

## D. ORDER OF MODEL COMPUTATIONS

Flow into and out of storage layers is computed for each time step in the SMA model. (Appendix B describes how the time step is selected.) The order of computations in each time step depends upon occurrence of precipitation or ET, as follows:

- If precipitation occurs during the interval, ET is not modeled. Precipitation contributes first to canopy-interception storage. Precipitation in excess of canopy-interception storage, combined with water already in surface storage, is available for infiltration. If the volume available is greater than the available soil storage, or if the calculated potential infiltration rate is not sufficient to deplete this volume in the determined time step, the excess goes to surface-depression storage. When surface-depression storage is full, any excess is surface runoff.  
  
Infiltrated water enters soil storage, with the tension zone filling first. Water in the soil profile, but not in the tension zone, percolates to the first groundwater layer. Groundwater flow is routed from the groundwater layer 1, and then any remaining water may percolate to the groundwater layer 2. Percolation from layer 2 is to a deep aquifer and is lost to the model.
- If no precipitation occurs, ET is modeled. Potential ET is satisfied first from canopy storage, then from surface storage. Finally, if the potential ET is still not satisfied from surface sources, water is removed from the upper-soil profile storage. The model then continues as described above for the precipitation periods.

## E. ESTIMATING MODEL PARAMETERS

SMA model parameters must be determined by calibration with observed data. In this iterative process, candidate parameter values are proposed, the model is exercised with these parameters and precipitation and evapotranspiration inputs. The resulting computed hydrograph is compared with an observed hydrograph for the same period. If the match is not satisfactory, the parameters are adjusted, and the search continues. Bennett (1998) and EM 1110-2-1417 offer guidance for this calibration. The automatic calibration algorithm described in Chapter 9 may be used to aid this search.

## II. SOIL MOISTURE ACCOUNTING MODEL DETAILS

### A. TIME INTERVAL SELECTION

Models included in the program rely on the solution of differential equations to estimate watershed runoff. To solve the equations, the models use a finite-difference approximation, as described in Chapter 6. A discrete time interval ( $\Delta t$ ) is selected for the approximation, and for this time interval, the program commonly uses the value defined by the user in the *control specifications*. So, for example, if the control specification calls for a 10-minute time interval, the curve number loss model is applied to compute infiltration for successive 10-minute intervals, and the unit hydrograph equations are solved to compute runoff hydrograph ordinates at 10-minute intervals. For these cases, the time interval is user-specified and is constant.

To ensure accuracy of solution of SMA model equations, the program determines and uses internally a *computational* time interval. This interval may be the user-specified interval, or it may be a fraction of that value. In either case, the program reports hydrograph ordinates at the user-specified interval. The time interval is selected as follows:

1. HEC-HMS finds a *minimum time interval* for each storage volume with potential to outflow, using procedures shown in Table
2. HEC-HMS selects the minimum interval from Step 1. If the user-specified value is less, it is used instead.
3. If the time interval calculated in Step 2 is larger than one-quarter of the time required to fill the combined available canopy, surface and soil profile storage, the interval is reduced to that value.
4. If the interval from Step 3 is greater than the precipitation data interval, the computational interval is set equal the precipitation interval.
5. If the interval from Step 4 is greater than 12 hours, the computational interval is reduced to 12 hours. If the interval is less than 1 minute, the interval is increased to 1 minute.
6. If the interval from Step 5 is greater than the remaining time in the user-specified interval, the computational interval is set equal the remaining time.
7. If the interval from Step 6 is less than the remaining time in the user-specified interval, the computational interval is adjusted so it is an even divisor of the remaining time.
8. If the remaining time less the interval found in Step 7 is less than one minute, the computational interval is set equal to the time remaining in the user-specified interval.

The time required to fill or drain storages varies throughout the simulation period, so the program varies the computational time interval throughout the simulation. To do so, it repeats these steps for each user-specified interval. So, for example, during periods in which water is moving rapidly into and out of the storages in the SMA, the program may select and use ten 1-minute computational intervals to account for soil moisture fluxes during a 10-minute user-specified interval. However, as the movement slows, the program may select a longer computational interval—perhaps using two 5-minute computational intervals during the 10-minute user-specified interval.

*Minimum time step for storages.*

<b>Storage</b>	<b>Minimum Time Step</b>
Canopy interception storage	$TimeStep = \frac{1}{4} \frac{CurCanStore}{PotEvapTrans}$ <p>Calculated only if evapotranspiration losses can occur and when the current canopy interception storage at the beginning of the time step exceeds the nominal storage volume.</p>
Surface interception storage	$TimeStep = \frac{1}{4} \frac{CurSurfStore}{PotSoilInfl + PotEvapTrans}$ <p>Calculated when potential evapotranspiration or infiltration losses &gt; 0, and <math>CurSurfStore &gt; 0</math>.</p>
Soil profile storage	$TimeStep = \frac{1}{4} \frac{CurSoilStore}{PotSoilPerc + PotEvapTrans}$ <p>Calculated when percolation or evapotranspiration can occur from the soil profile, and <math>CurSoilStore &gt; 0.0001</math> inches.</p>
Groundwater storage	$TimeStep = \frac{1}{4} \frac{CurGw1Store}{PotGw1Perc}$ <p>Calculated when percolation (loss) can occur from a groundwater layer, and the current volume in a groundwater layer &gt; 0</p> <hr/> $TimeStep = \frac{1}{16} RoutGw1Store$ <p>Calculated when the groundwater storage volume divided by the linear reservoir routing coefficient &gt; 0</p>
Precipitation intensity	$TimeStep = \frac{1}{4} \frac{MaxCanStore + MaxSurfStore + MaxSoilStore}{PrecipTimeStep}$ <p>Calculated when <math>PrecipTimeStep &gt; 0</math></p>

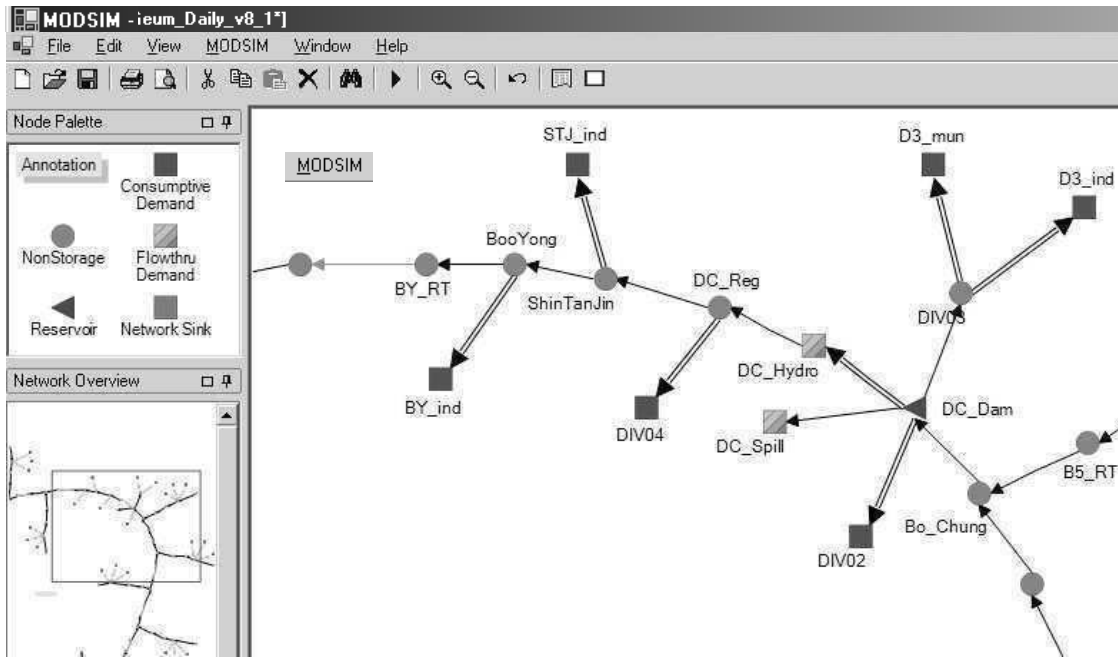
**Note:**

1 TimeStep = time step for storage; CurCanStore = current canopy interception storage; CurSurfStore = current surface interception storage; CurSoilStore = current soil profile storage; MaxCanStore = maximum canopy interception storage; MaxSurfStore = maximum surface interception storage; MaxSoilStore = maximum soil profile storage; CurGw1Store = current groundwater storage; PotEvapTrans = potential ET; PotSoilInfl = potential infiltration; PotSoilPerc = potential percolation from soil profile; PotGw1Perc = potential percolation from groundwater layer; RoutGw1Store = coefficient for groundwater linear reservoir model; PrecipTimeStep = time step for specification of precipitation data.

# I. RIVER BASIN NETWORK DEVELOPMENT IN MODSIM

## A. MODSIM GUI for Network Creation and Editing

The graphical user interface (GUI) for MODSIM as shown in Fig. 3 provides spatially-referenced database capabilities allowing users to create and link river basin network objects on the display, and then populate data for that object by right-mouse click to activate the object and open a database form associated with that object. Lengthy time series data for streamflows, demands, etc., can be imported from Excel (\*.xls), Access (\*.dbf) or comma-separated ASCII files (\*.csv), or by copying data into the Windows Clipboard and pasting into the appropriate **Node Properties** form. Time series data can



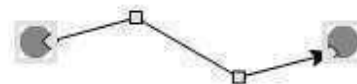
Graphical user interface for MODSIM



also be loaded automatically through development of custom code, as discussed subsequently. All MODSIM input data are stored in a command-oriented ASCII text file \*.xy where each line of input begins with a command that the input parsing code associates with a model construct, with data values relevant to the modeled feature following the command.

The main *Menu Bar* for MODSIM is located at the top of the *Network Editor Window* in the interface, along with a *Toolbar* below the *Menu Bar* with single click access to several menu items. The menu items are used to load and save a MODSIM network, import and export data, select English or metric units, search for specific nodes and links, run the model, select and display graphs; create, edit and generate tabular reports; access various utilities, print out the network, and more. The interface contains icons in the *Node Palette Window* for creating various types of nodes in the network by simply dragging them into the *Network Editor Window*, or *left-button mouse* clicking on the icon and then clicking on the desired location in the *Network Editor Window*. Links or arcs are created in the *Network Editor Window* by moving the cursor onto the origin node until a *pointing hand* icon appears, holding down the *left-mouse button*, and then dragging the pointer to the desired ending node, which also sets the *flow direction* for that link. The *Network Overview Window* is useful for large networks where the display window of any size can be panned over any portion of the network.

Clicking on any node object in the *Network Editor Window* makes that object *active*, which is indicated by the node being highlighted in a yellow box. Once a node is located in the *Network Editor Window*, it can be easily moved by *left-button mouse click and hold*, and then dragging it to the desired location. All links connected to that node will be moved along with the node. Groups of node and links can be moved together by *left-button mouse click and hold* and dragging a rectangular area encompassing the groups of nodes and links to be moved, with selected nodes highlighted in yellow boxes and selected links highlighted with yellow break points. Any actions within the *Network Editor Window* can be undone by the user by selecting **Edit > Undo** in the *Main Menu Bar*.



*Right-button mouse click* on any node in the *Network Editor Window* displays a context menu with several items. **Cut** allows the node to be deleted and pasted at another location, whereas **Delete** removes the node without paste retrieval. **Copy** retains the node and creates a copy that users can **Paste** (with or without data) to any location in the Window. **Copy To** allows all of the attributes of the selected node to be copied to another user-specified node, whereas **Copy From** allows all properties of another node to be copied to the current selected node. **Hide Label** is useful for removing excess notation in the *Network Editor Window* for nodes where labels are not important for display. Selecting **Properties** opens the database form for that node, allowing the user to enter and edit all of the data and attributes associated with that object. The **Properties** form can also be directly activated by double clicking on the node object.



For example, selecting **Properties** for the flow-through demand *75cfs* in the *Prineville* network below (Crooked River basin, Oregon) displays its tabbed **Node Properties** form, allowing manual entry, import (by cut and paste), and editing of all data associated with that network object.

The screenshot shows the KModSim software interface. The main window displays a network diagram for the 'Bureau of Reclamation Crooked River Project, Oregon'. The diagram includes nodes like 'Prine1', 'Prineville Reservoir', '75cfs', 'gainsCR', 'RiceB', and 'CRFeed2'. A context menu is open over the '75cfs' node, with 'Properties' selected. The 'Demand Node Properties (28)' dialog box is open, showing the following details:

**Node Name:** 75cfs  
**Description:** 75cfs except 35cfs in dry months

**General** | **Time Series** | **Flow Thru**

**Data** | **Plot**

Varies By Year  Interpolate Units: acre-ft / month

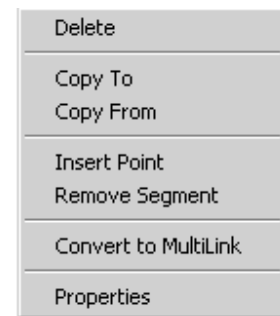
**Time Series Data (m/d)**

Start Date	Dry	1	2	Wet
10/01	2152	4611	4611	4611
11/01	2083	4463	4463	4463
12/01	2152	4611	4611	4611
02/01	1944	4165	4165	4165
03/01	2152	4611	4611	4611
04/01	2083	4463	4463	4463
05/01	2152	4611	4611	4611

Buttons: **OK** **Cancel** **Apply**

After a MODSIM run is executed, *right-button mouse click* on a node again opens the context menu, but with an added item: **Graph**, which allows rapid display of output results.

Clicking on any link object in the *Network Editor Window* makes that object *active*, which is indicated by display of yellow square-shaped *break point markers* along the link, as well as yellow diamond-shaped markers at the link beginning and end points. *Break points* can be moved by simply clicking on them and dragging, thereby allowing users to change the shape of the link. By default, when a link is first created a single *break point* is inserted in the center of the link, but additional break points can be inserted by the user. Similar to nodes, *right-button mouse click* on links also opens a context menu with items **Delete**, **Copy To**, **Copy From**, **Insert Point**, **Remove Segment**, **Convert to MultiLink**, and **Properties**. Similar to the node context menu, once a MODSIM run is completed, the **Graph** item is added to the link context menu.



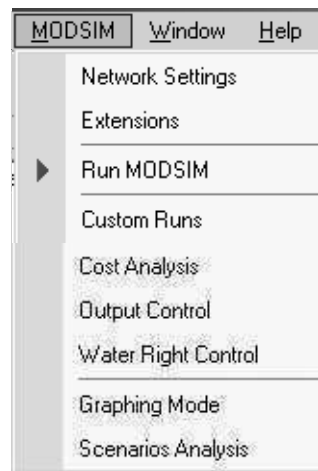
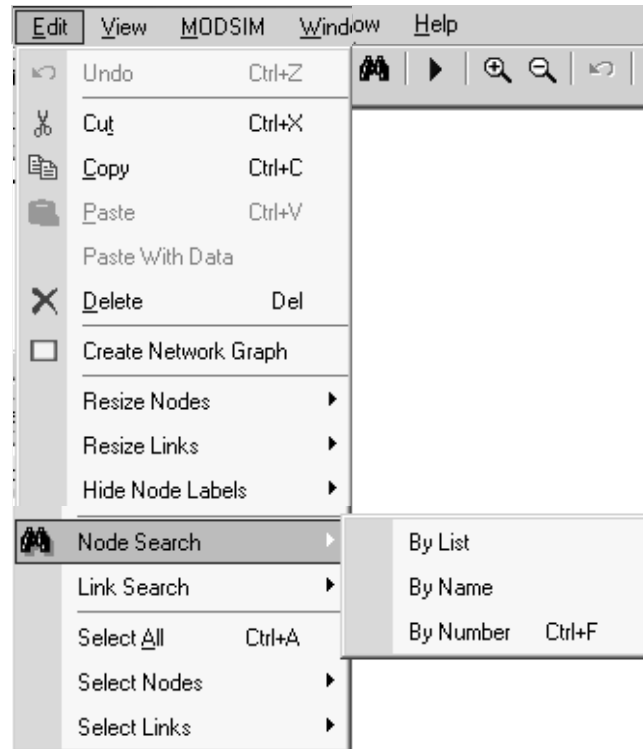
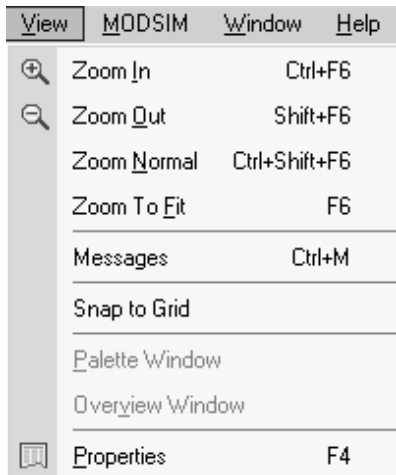
**Insert Point** allows users to introduce additional *break points* in the link, thereby changing its shape as connected line segments. **Remove Segment** performs the opposite operation by removing any segment. **Convert to MultiLink** allows the user to specify any desired number of separate links connecting the same two nodes, and **Properties** opens the database form, allowing the user to enter and edit all data and attributes associated with that link object. Once a link object is converted to a *MultiLink*, it is displayed as a double arrow in the *Network Editor Window*. In addition, for simulations using a daily time step, any link can be specified as a **channel routing link** in the **Link Properties** form, which changes the color of the link to orange. As with nodes, the **Link Properties** form can also be directly activated by double clicking on the link object. Similar to the **Node Properties** form, the **Link Properties** form is tabbed for each data category, with spreadsheet-style data entry for tabular data.



Under the **Edit Pull-Down Menu**, a number of useful operations on network objects are available, such as **Undo**, **Cut**, **Copy**, **Paste**, **Delete**, **Resize Nodes and Links**, **Node and Link Search**, and various **Select** options. Various tools such as **Resize Node**, **Resize Links**, and **Hide Node Labels** provide the user with various options for changing the network display. **Node Search** and **Link Search** is particularly useful for large networks, where a particular node and link can be selected from a scrollable list or directly entered by name or number, where each network object created in MODSIM is automatically assigned a unique number. The network display then shifts to the region surrounding the

selected node or link, which is highlighted as an active object. **Select Nodes** and **Select Link** is useful for output of results for only those objects of interest in the simulation.

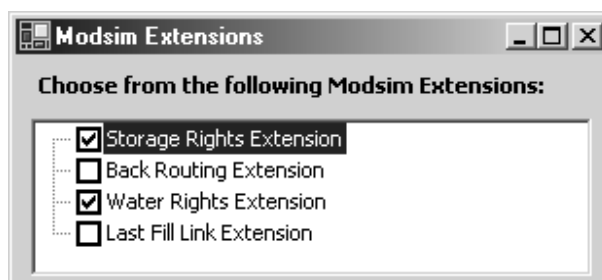
The **View** menu on the *Main Toolbar* provides additional features, including **Zoom** control, **Messages** displaying of information on the status of the MODSIM run, and **Snap to Grid**, which when activated, snaps created or moved objects in the *Network Editor Window* to a finite grid for ease of

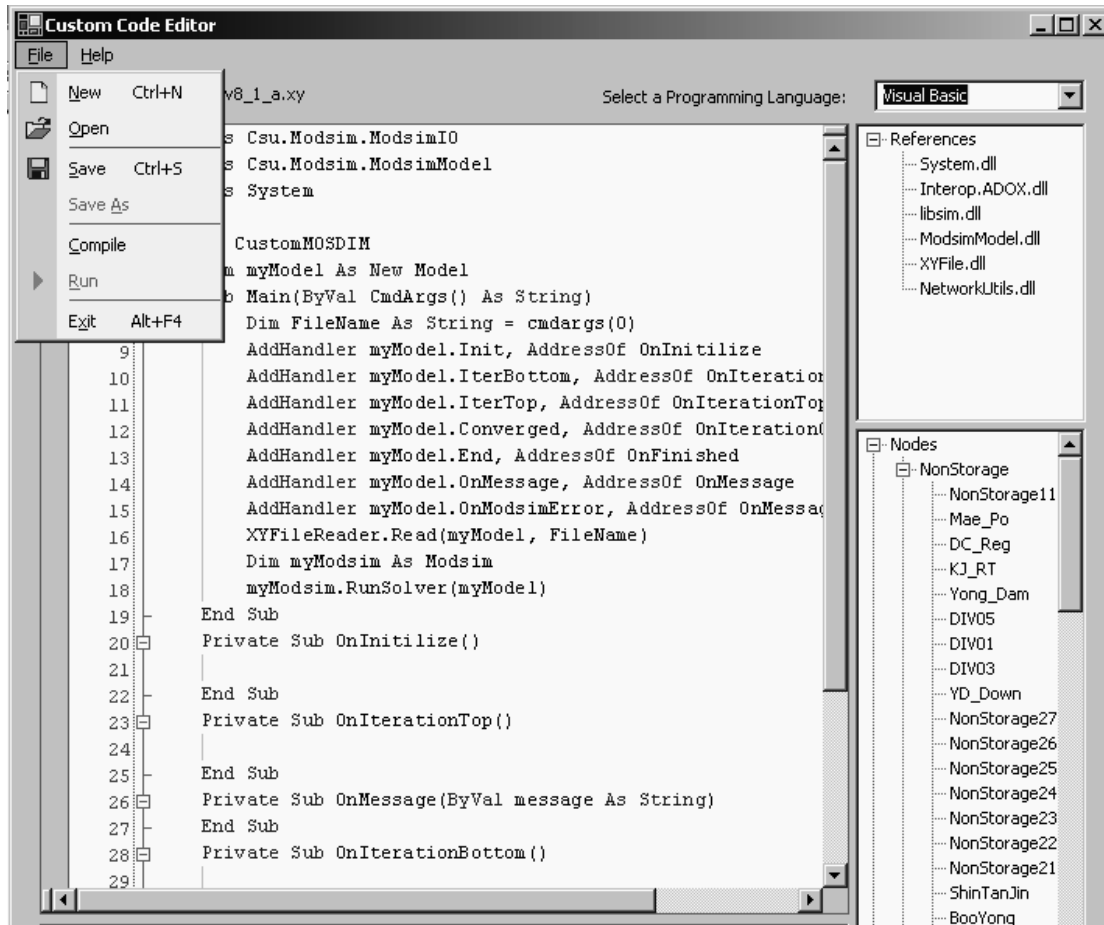


alignment of objects. Un-checking **Snap to Grid** allows objects to be moved to any location in the *Window*.

Once the system network has been created and the database populated, MODSIM can be executed from the interface under **MODSIM > Run MODSIM**.

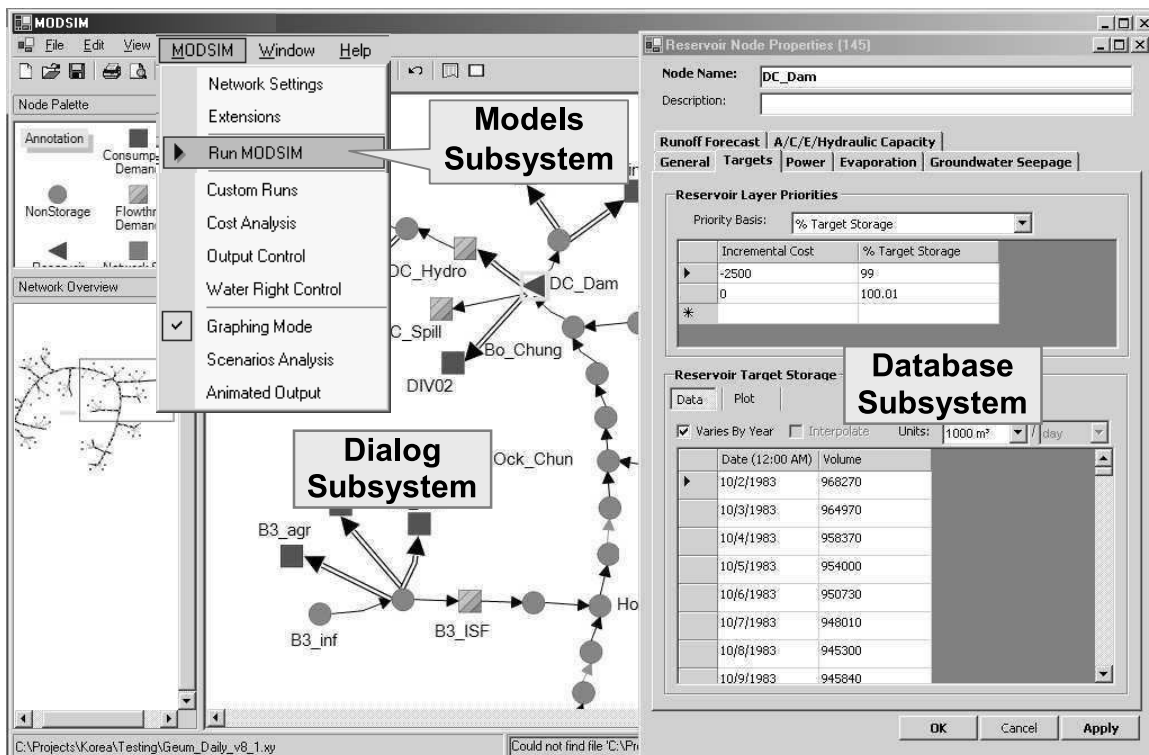
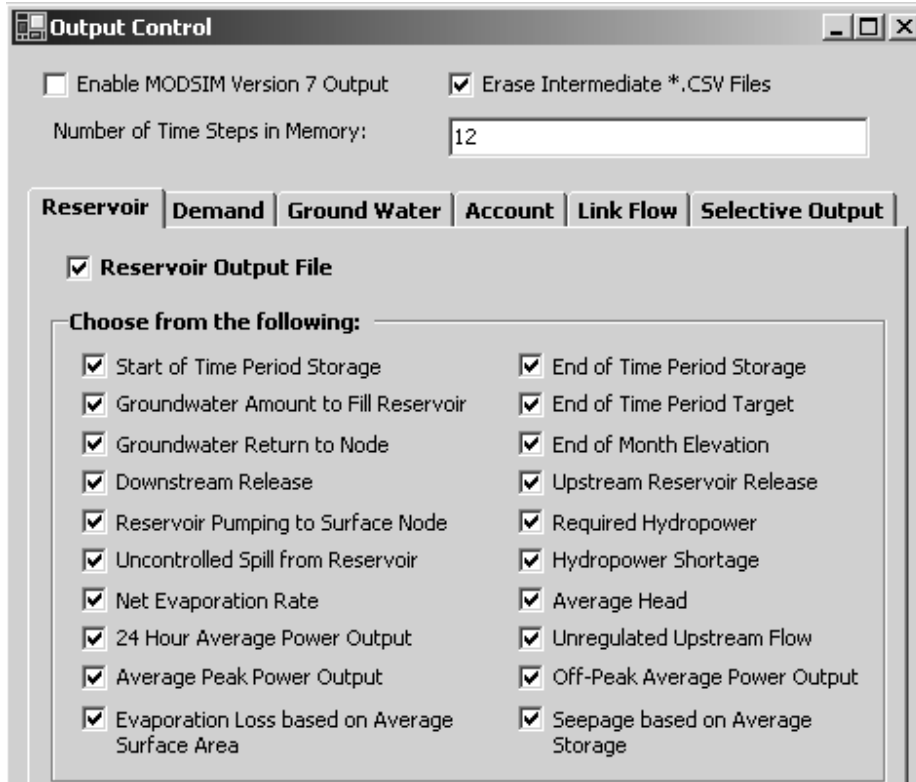
A number of useful **Extensions** are included with MODSIM: **Storage Rights**, **Back-Routing**, **Water Rights**, and **Last-Fill Extensions**.





**MODSIM > Custom Runs** invokes the **Custom Code Editor** for creating customized versions of MODSIM developed from user-supplied code written in VB.NET or C#.NET. Customized versions of MODSIM can be compiled and executed from the interface. A convenient template is provided in the **Custom Code Editor** for guiding users in the preparation of customized code. The customized code can interface with MODSIM at any desired strategic locations, including data input, execution at the beginning of any time step, processing at intermediate iterations, and model output. Users are provided direct access to all of *Public* variables, parameters, and object classes in MODSIM for development of knowledge-based operating rules, linkage with on-line database management systems, customized output reports, and color-coded graphical displays. Details on use of the **Custom Code Editor**, along with several examples of custom code development, can be found in Tutorial C in the set of Tutorials associated with this User Manual.

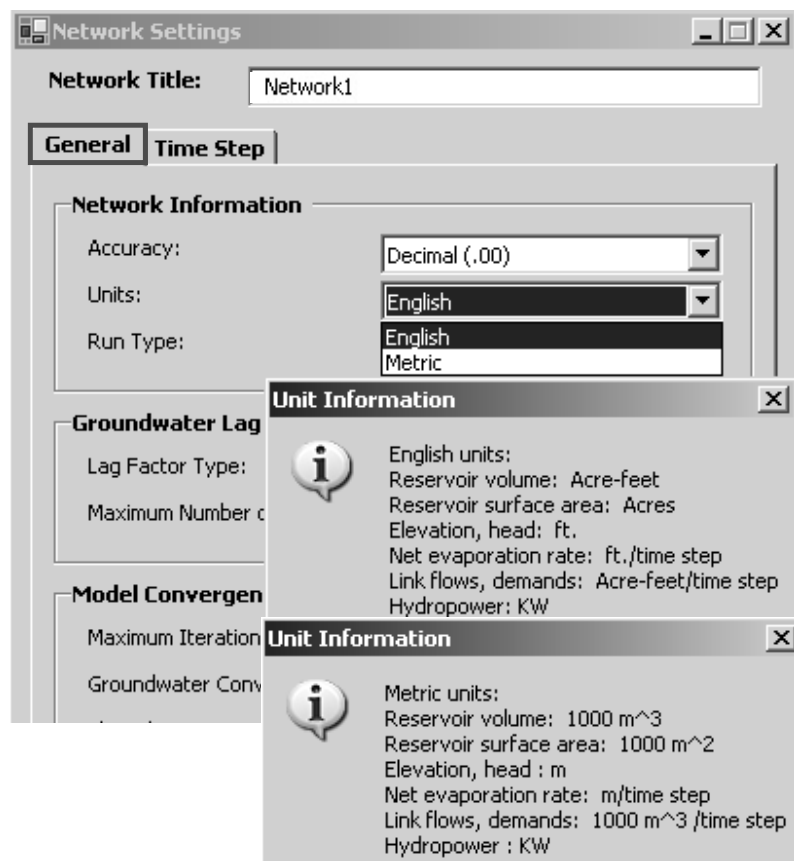
**Output Control** provides an extensive variety of graphical and text output options for any combinations of network objects and output data types. In the production of output results, the user can specify the number of time steps held in memory. Retaining output results over several time steps in main memory generally results in faster execution speed, but also requires larger SDRAM memory.



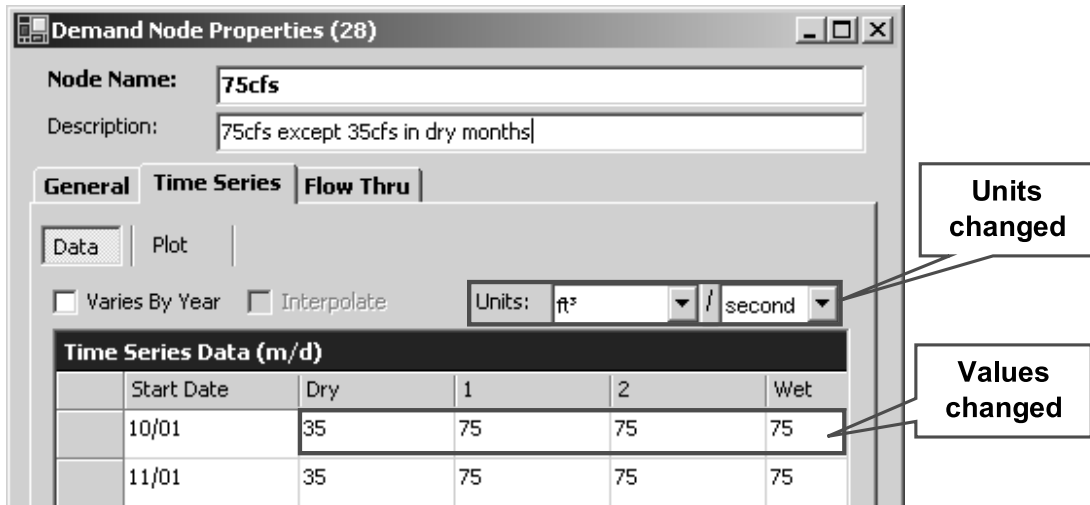
## II. GENERAL SETTINGS FOR MODSIM NETWORKS

### A. Accuracy and Units

**Network Settings** > **General** under **MODSIM** on the main menu bar allows users to specify a number of options. The desired accuracy for data input and flow results can be either integer accuracy or 2-place decimal accuracy. Users can select either English or metric units, with the default units used for storage, flow, head, net evaporation rates and hydropower specified. However, users may input data in any desired units in the node and link properties forms, and MODSIM will automatically convert the data to the default units.

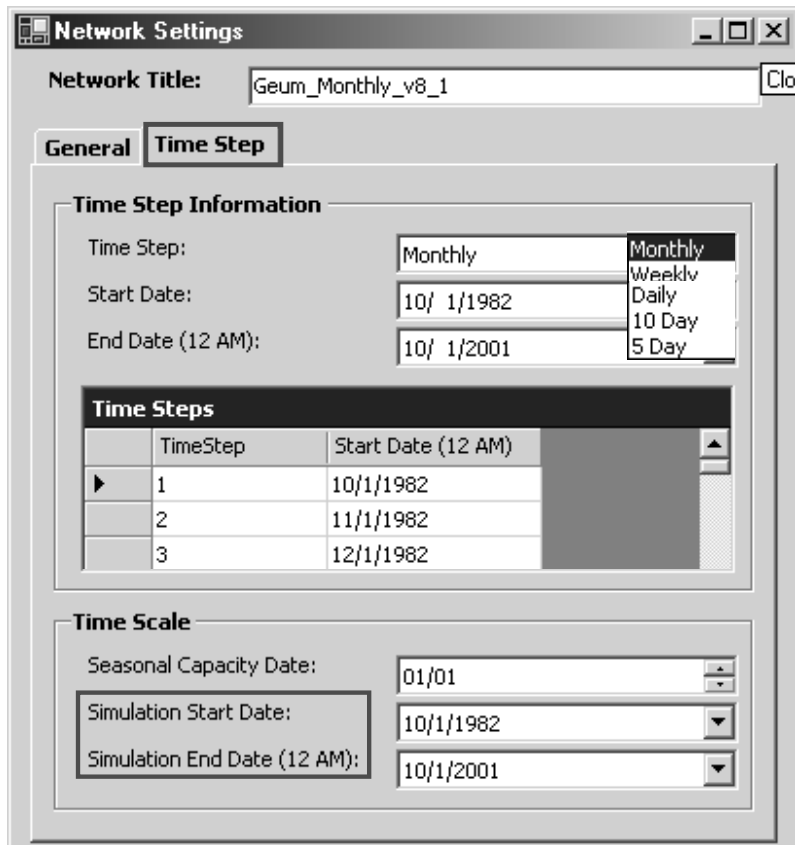


Units can be changed directly in the Node or Link Properties forms. For example, consider again the **Demand Node Properties** form for the flow-through demand  $75\text{cfs}$  in the example *Prineville* network. It is desired to change the original units of ac-ft/month to average cfs ( $\text{ft}^3/\text{sec}$ ) over each time step. The units are easily changed to  $\text{ft}^3/\text{second}$  in the dropdown lists in the **Units** field of the form.



## B. Time Steps and Scale

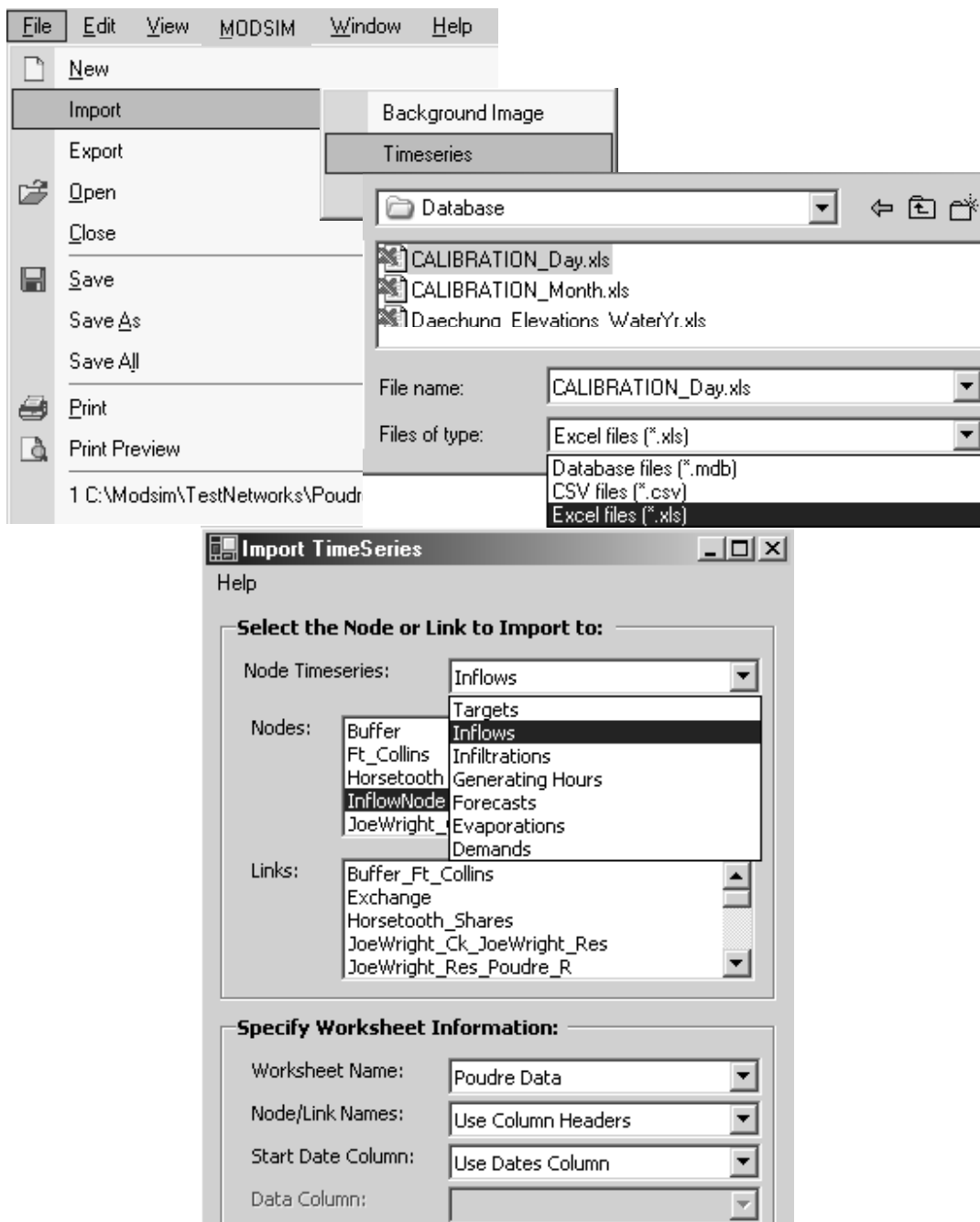
**MODSIM > Network Settings > Time Step** allows *monthly*, *weekly*, or *daily* simulation time steps to be specified, as well as *10-day* and *5-day* time steps for certain international applications. *Start Date* and *End Date* for time series data entered into MODSIM must be the same for all data including inflows, demands, reservoir storage targets, etc. However, a MODSIM simulation run can start and end at any intermediate dates, as specified in the **Time Scale** field of the form. This is useful, for example, for critical period studies on drought sequences within the entire historical hydrologic data set.





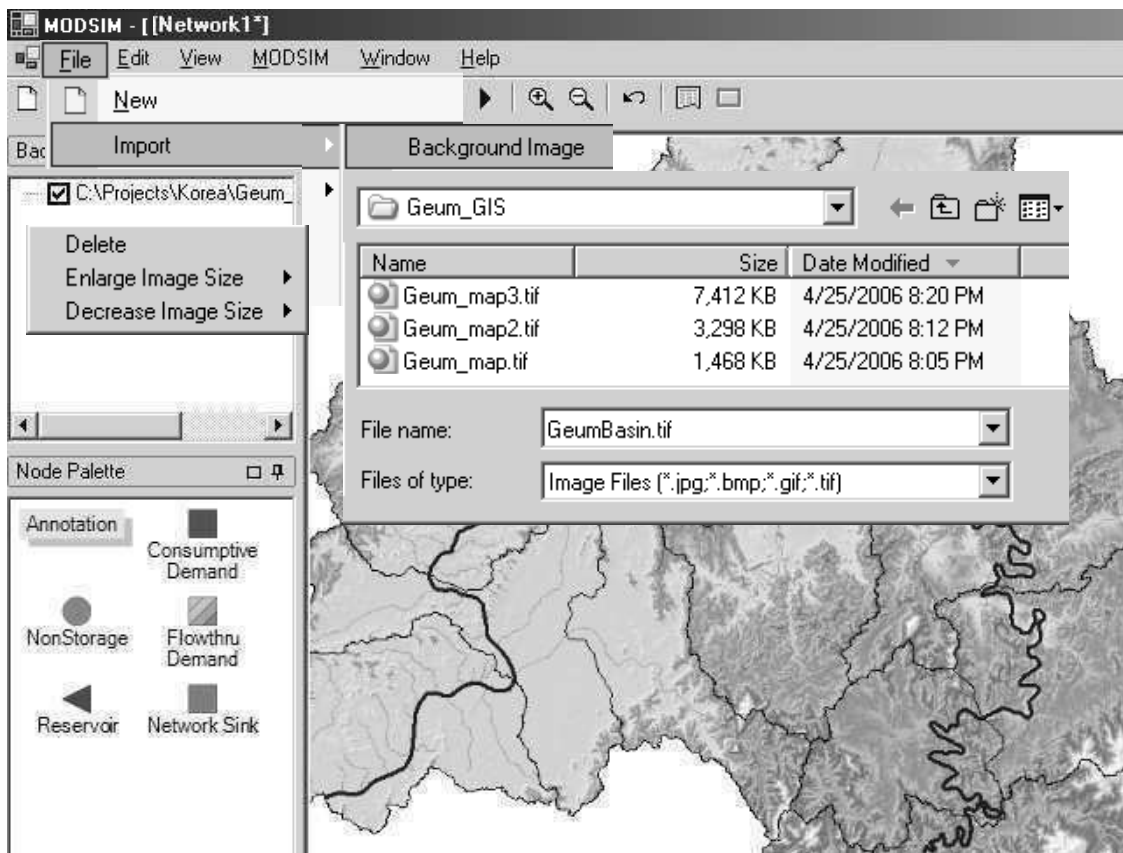
## C. Import of Time Series Data

The MODSIM GUI includes powerful tools for automatically importing time series data from MS Access (\*.dbf), MS Excel (\*.xls), and comma-separated ASCII files (\*.csv) into node and link objects, including unregulated inflows, demands, target storage levels, and link capacities. If the database column headers correspond to the exact names (case sensitive) of the MODSIM nodes and links, then the **Import Time Series** tool automatically loads the appropriate data into those objects.



## D. Background Images

MODSIM provides tools for importing terrain images and feature maps of the study area for configuring network nodes and links corresponding to spatial locations of system elements. Images can be created from GIS layers, downloaded from Internet map providers, or obtained from sources such as Google Earth for high resolution aerial and satellite imagery and feature data sets for any location on earth. Map images can be enlarged or reduced in the *Network Editor Window*. Although several map images can be loaded, only the top layer is visible in the Window.



Import of background images into the MODSIM display.

440,000 445,000 450,000 455,000 460,000 465,000 470,000 475,000



8,690,000  
8,685,000  
8,680,000  
8,675,000  
8,670,000

8,690,000  
8,685,000  
8,680,000  
8,675,000  
8,670,000

**MAPA DE UBICACIÓN POLÍTICA**



**MAPA DE UBICACIÓN HIDROGRÁFICA**

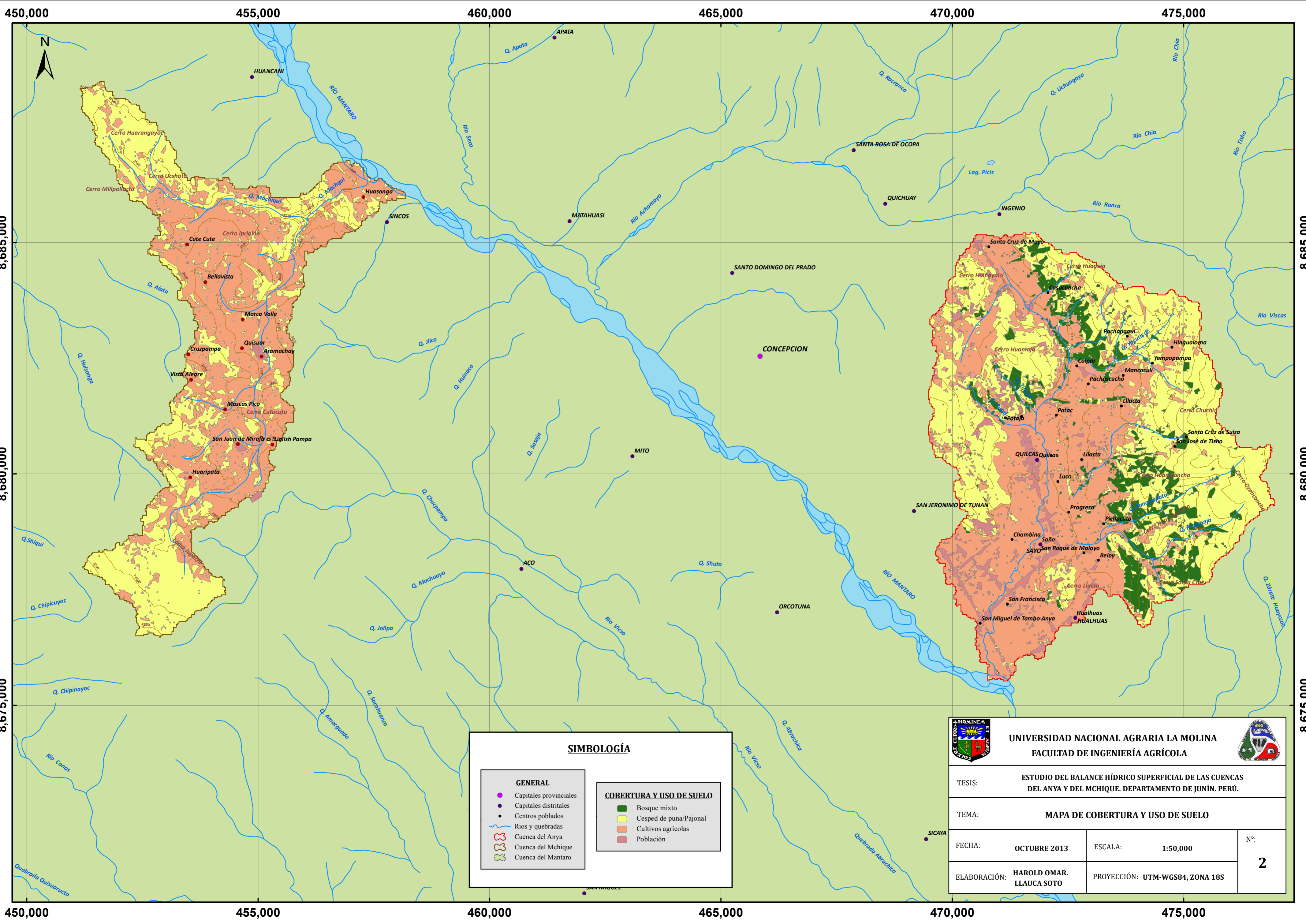


**SIMBOLOGÍA**

- | GENERAL |                        | VÍA |                       |
|---------|------------------------|-----|-----------------------|
| ●       | Capitales provinciales | —   | Vía férrea            |
| ●       | Capitales distritales  | —   | Carretera asfaltada   |
| ●       | Centros poblados       | —   | Carretera afirmada    |
| ■       | Zonas urbanas          | —   | Carretera no afirmada |
| —       | Curvas de nivel        | —   | Trocha carrozable     |
| —       | Ríos y quebradas       | —   | Carretera en proyecto |
| —       | Cuenca del Anya        |     |                       |
| —       | Cuenca del Mchique     |     |                       |
| —       | Cuenca del Mantaro     |     |                       |

<p><b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA</b> FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA</p>			
TESIS:		ESTUDIO DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE LAS CUENCAS DEL ANYA Y DEL MCHIQUE. DEPARTAMENTO DE JUNÍN. PERÚ.	
TEMA:		MAPA DE UBICACIÓN DE LAS CUENCAS ANYA Y MCHIQUE	
FECHA:	OCTUBRE 2013	ESCALA:	1:75,000
ELABORACIÓN:	HAROLD OMAR. LLAUCA SOTO	PROYECCIÓN:	UTM-WGS84, ZONA 18S
			Nº: <b>1</b>

440,000 445,000 450,000 455,000 460,000 465,000 470,000 475,000

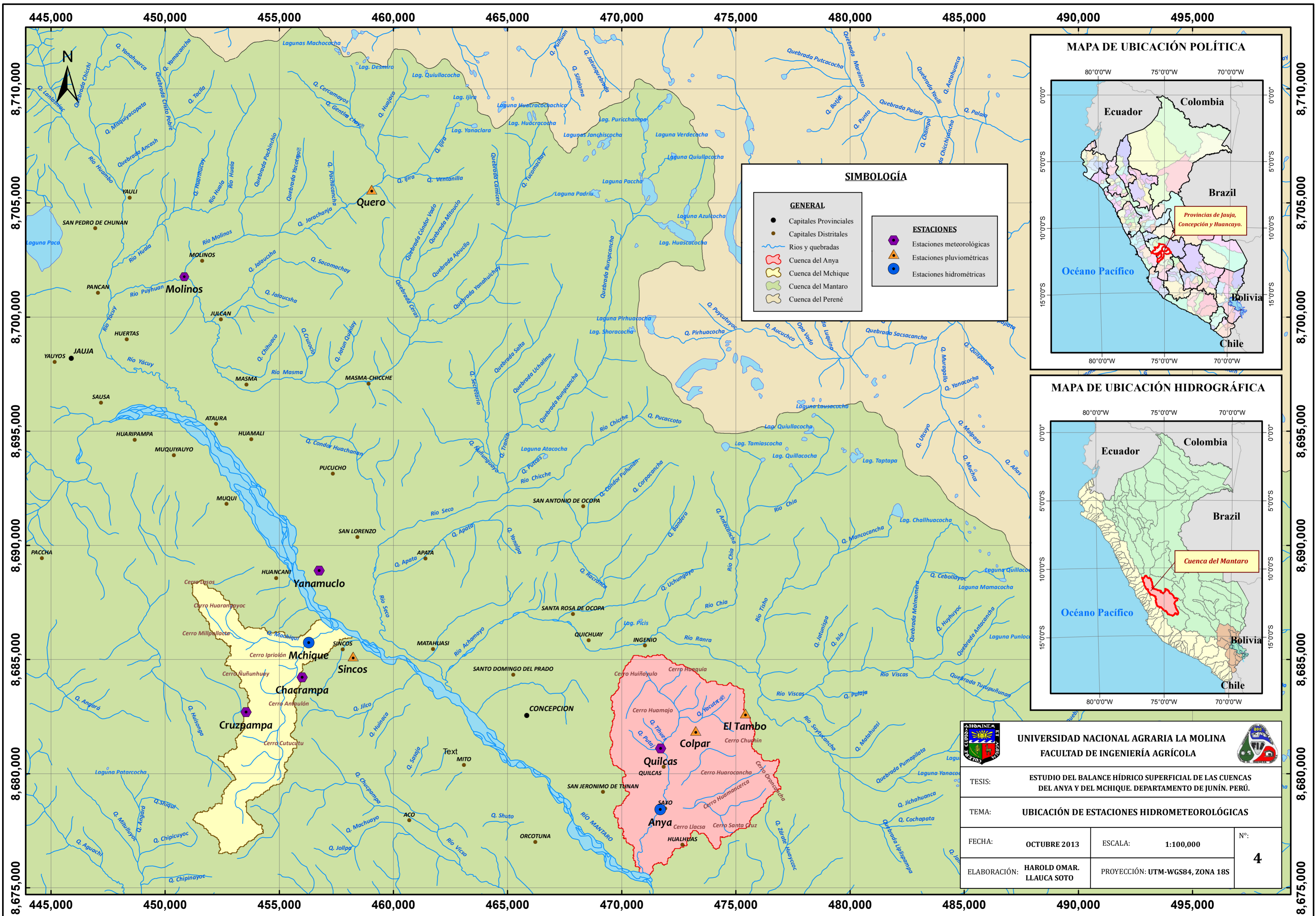


**SIMBOLOGÍA**

- |  |  |
|--|--|
| <p><b>GENERAL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Capitales provinciales</li> <li>● Capitales distritales</li> <li>● Centros poblados</li> <li>~ Ríos y quebradas</li> <li>⊞ Cuenca del Anya</li> <li>⊞ Cuenca del Mchique</li> <li>⊞ Cuenca del Mantaro</li> </ul> | <p><b>COBERTURA Y USO DE SUELO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bosque mixto</li> <li>■ Césped de puna/Pajonal</li> <li>■ Cultivos agrícolas</li> <li>■ Población</li> </ul> |
|--|--|

	<p><b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA</b>  <b>FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA</b></p>			
<p>TESIS: ESTUDIO DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE LAS CUENCAS DEL ANYA Y DEL MCHIQUE. DEPARTAMENTO DE JUNÍN. PERÚ.</p>				
<p>TEMA: <b>MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO</b></p>				
FECHA:	OCTUBRE 2013	ESCALA:	1:50,000	N°:  <b>2</b>
ELABORACIÓN:	HAROLD OMAR LLAUCA SOTO	PROYECCIÓN:	UTM-WGS84, ZONA 18S	





### SIMBOLOGÍA

GENERAL	
●	Capitales Provinciales
●	Capitales Distritales
~	Rios y quebradas
⬭	Cuenca del Anya
⬭	Cuenca del Mchique
⬭	Cuenca del Mantaro
⬭	Cuenca del Perené

ESTACIONES	
⬭	Estaciones meteorológicas
⬭	Estaciones pluviométricas
⬭	Estaciones hidrométricas



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA</b>		
	TESIS: ESTUDIO DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE LAS CUENCAS DEL ANYA Y DEL MCHIQUE. DEPARTAMENTO DE JUNÍN. PERÚ.		
TEMA: UBICACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS			
FECHA:	OCTUBRE 2013	ESCALA:	1:100,000
ELABORACIÓN:	HAROLD OMAR LLAUCA SOTO	PROYECCIÓN:	UTM-WGS84, ZONA 18S
			4