ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

EVALUACIÓN HIDROLÓGICA - HIDRAÚLICA Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO "VIRGEN DE LAS NIEVES", COMUNIDAD COMPAÑÍA OBRAJE DEL CANTÓN COLTA - PROVINCIA DEL CHIMBORAZO MEDIANTE EL USO DE WATERGEMS Y CROPWAT

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MASTER EN HIDRÁULICA MENCIÓN GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

LISETH VERENICE ORBE PINCHAO
liseth.orbep@epn.edu.ec
VALERIA PAOLA RAMOS BERMEO
valeriaramosbermeo@gmail.com

DIRECTOR: ING. VERÓNICA MINAYA MALDONADO PhD
veronica.minaya@epn.edu.ec
CODIRECTOR: ING. XAVIER ZAPATA RÍOS PhD
xavier.zapata@epn.edu.ec

Quito, enero 2020

DECLARACIÓN

Nosotros, Liseth Verenice Orbe Pinchao y Valeria Paola Ramos Bermeo, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

LISETH VERENICE ORBE PINCHAO

VALERIA PAOLA RAMOS BERMEO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Liseth Verenice Orbe Pinchao y Valeria Paola Ramos Bermeo, bajo mi supervisión.

ING. VERÓNICA MINAYA MALDONADO PhD

DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

Este escrito está dedicado a Dios por siempre haber guiado mi camino, a mi madrecita, mi ñañito, mis abuelitos, mi papi y a Santy por haberme dado la fuerza, el amor y el apoyo necesario para que pueda cumplir mis metas.

Liseth Orbe

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Politécnica Nacional, la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, por brindar la oportunidad de crecer profesionalmente.

A los docentes de la Maestría de Hidráulica que con sus experiencias me han inspirado y me han brindado sus conocimientos.

A la Ing. Verónica Minaya por su guía, apoyo y paciencia para el desarrollo de este proyecto y por corregirnos con cariño.

A Ing. Mercedes Villacis por su amistad y por el apoyo en todos los ámbitos de mi vida.

A Valeria por la confianza y el apoyo incondicional durante todo este tiempo.

A July, Lady, Kary y David por formar parte de mi vida y por su apoyo incondicional.

Liseth Orbe

DEDICATORIA

A mis padres, Henry y Marina, por ser la fuerza fundamental de mi vida y el ejemplo de disciplina.

A mis sobrinas, mis hermanos y mi familia por el apoyo a la distancia.

A mis amores, Cristian y Pika, por ser el aliento constante para terminar esta etapa.

A mis queridos amigos, que han aportado con sus enseñanzas y apoyo profesional.

Valería Ramos Bermeo

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme salud y sabiduría para culminar mis estudios, a mis amados padres, por su apoyo incondicional.

Mi sincera gratitud a la Ing. Verónica Minaya, por su apoyo y asesoramiento, en todas las etapas de este proyecto.

De manera especial a todos los profesores de la Maestría en Hidráulica – Gestión de Recursos Hídricos, por brindarnos el conocimiento, exigencia y guianza durante esta etapa.

A Lis, por apoyarme en este proyecto de tesis.

Valería Ramos Bermeo

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN I
CERTIFICACIÓN II
DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTO IV
DEDICATORIA V
AGRADECIMIENTO VI
ÍNDICE DE CONTENIDO VII
LISTA DE FIGURAS X
LISTA DE TABLAS XIV
RESUMEN XV
ABSTRACT XVII
1 INTRODUCCIÓN 19
1.1 ANTECEDENTES 19
1.2 JUSTIFICACIÓN 21
1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA 21
1.2.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA 22
1.2.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA 23
1.3 OBJETIVOS 24
1.3.1 OBJETIVO GENERAL 24
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 24
1.4 ALCANCE 25
2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE 26
2.1 MARCO TEÓRICO 26
2.1.1 CONCEPTOS GENERALES 26
2.1.2 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE RIEGO 41
2.1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PAQUETE COMPUTACIONAL WATERGEMS 45

2.1.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PAQUETE COMPUTACIONAL CROPWAT 49
2.1.5 REVISIÓN DEL MARCO LEGAL Y CONCESIONES EXISTENTES 58
2.1.6 OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE SISTEMAS DE RIEGO EXISTENTES 61
2.2 ESTADO DEL ARTE 62
2.2.1 REVISIÓN DE INVESTIGACIONES 63
3 METODOLOGÍA 67
3.1 ÁREA DE ESTUDIO 67
3.1.1 UBICACIÓN 67
3.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA 68
3.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE 77
3.2.1 VARIABLES METEOROLÓGICAS 77
3.2.2 VARIABLES HIDROLÓGICAS 81
3.3 MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE RIEGO USANDO WATERGEMS 94
3.3.1 ANÁLISIS DE SITUACIÓN ACTUAL 94
3.4 MODELACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE AGUA DE LOS CULTIVOS MEDIANTE CROPWAT 95
3.4.1 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN 95
3.4.2 VARIABLES DEL MODELO 102
3.5 OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE RIEGO VIRGEN DE LAS NIEVES 103
3.5.1 AJUSTE DE LAS DEMANDAS MEDIANTE CROPWAT 103
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 104
4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA 104

4.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA 104
4.1.2 VARIABLES METEOROLÓGICAS 107
4.1.3 VARIABLES HIDROLÓGICAS 121
4.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE RIEGO 133
4.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA CONDUCCIÓN 133
4.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN 146
4.2.3 MODELACIÓN EN WATERGEMS 149
4.3 REQUERIMIENTOS DE AGUA DE LOS CULTIVOS 164
4.3.1 DOTACIÓN DE AGUA EN LOS CULTIVOS DEL SISTEMA ACTUAL 164
4.3.2 REQUERIMIENTO DE AGUA DE LOS CULTIVOS MEDIANTE CROPWAT. 165
4.3.3 ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA VS EL REQUERIMIENTO DE AGUA PARA LOS CULTIVOS 166
4.4 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VIRGEN DE LAS NIEVES 167
4.5 SITUACIÓN LEGAL DE LA CUENCA 168
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 172
5.1 CONCLUSIONES 172
5.2 RECOMENDACIONES 175
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 177
ANEXOS 185

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Balance de energía entre dos puntos de un fluido. 28
FIGURA 2 Redes abiertas 30
FIGURA 3 Flujo en canales abiertos 31
FIGURA 4 Energía en canal abierto para flujo gradualmente variado 34
FIGURA 5 Ciclo hidrológico 39
FIGURA 6 Volumen de control para determinar las ecuaciones de evaporación. 40
FIGURA 7 Esquema de los tipos de cálculo que realiza Watergems. 45
FIGURA 8 Esquema del funcionamiento del período estático (SS). 46
FIGURA 9 Esquema del funcionamiento de la optimización de Watergems. 47
FIGURA 10 Esquema de entradas y salidas de Watergems. 48
FIGURA 11 Esquema de entradas y salidas de Cropwat. 50
FIGURA 12 Ubicación de la Cuenca del rio Chibunga. 67
FIGURA 13 Cuenca del Rio Chibunga y Sistema de Riego de interés, Virgen de las Nieves. 70
FIGURA 14 Mapa de elevaciones de la cuenca del rio Chibunga. 71
FIGURA 15 Textura de la cuenca del río Chibunga 72
FIGURA 16 Cobertura de la cuenca del río Chibunga 73
FIGURA 17 Distribución geográfica de los climas. 75
FIGURA 18 Estaciones meteorológicas de la cuenca del rio Chibunga 80
FIGURA 19 Ubicación de estaciones hidrológicas 83
FIGURA 20 Mapa de litología de la cuenca del Chibunga. 99
FIGURA 21 Orden de la red drenaje de la cuenca del rio Chibunga 105
FIGURA 22 Subcuencas de la Cuenca del rio Chibunga y Comunidad de la Virgen de las Nieves 106
FIGURA 23 Curva de variación media mensual de la precipitación usando la estación M393 107

FIGURA 24 Correlación entre las estaciones M394 y M393 para Precipitación media mensual.....108
FIGURA 25 Curva de variación media mensual de la precipitación usando la estación M394.....109
FIGURA 26 Correlación entre las estaciones M258 y M133 para Temperatura media mensual.....110
FIGURA 27 Curva de variación de la temperatura media mensual de la estación M-258.....110
FIGURA 28 Correlación entre las estaciones M133 y M258 para Temperatura media mensual.....111
FIGURA 29 Curva de variación de la temperatura media mensual de la estación M-133.....112
FIGURA 30 Correlación entre las estaciones M258 y M128 para Evaporación media mensual. 113
FIGURA 31 Curva de variación de la evaporación media mensual de la estación M-258.....113
FIGURA 32 Correlación entre las estaciones M128 y M258 para Evaporación media mensual. 114
FIGURA 33 Curva de variación de la evaporación media mensual de la estación M-128.....114
FIGURA 34 Curva de variación de la humedad media mensual de la estación M-258.....115
FIGURA 35 Curva de variación de la humedad media mensual de la estación M-133.....116
FIGURA 36 Curva de variación de la nubosidad media mensual de la estación M-258.....117
FIGURA 37 Curva de variación de la tensión de vapor media mensual de la estación M-258. 118
FIGURA 38 Curva de variación del viento media mensual de la estación M-258. 119
FIGURA 39 Curva de variación de heliofanía media mensual de la estación M-258.....120

FIGURA 40 Curva de duración general de la estación H-787. 121
FIGURA 41 Curva de variación estacional de la estación H-787. 122
FIGURA 42 Correlación entre las estaciones H764 y H787. 122
FIGURA 43 Curva de duración general de la estación H-764. 123
FIGURA 44 Curva de variación estacional de la estación H-764. 124
FIGURA 45 Correlación entre las estaciones H781 y H787. 124
FIGURA 46 Conducción del Sistema de riego. 131
FIGURA 47 Captación No. 1 de Virgen de las Nieves 134
FIGURA 48 Vegetación alrededor de la Captación No. 1 de Virgen de las Nieves 134
FIGURA 49 Captación No. 2 de Virgen de las Nieves 135
FIGURA 50 Vegetación alrededor de la Captación No. 2 de Virgen de las Nieves 135
FIGURA 51 Tanque rompe presión TRP-1 de Virgen de las Nieves.....136
FIGURA 52 Captación No. 3 de Virgen de las Nieves 136
FIGURA 53 Tanque rompe presión TRP-2 de Virgen de las Nieves.....137
FIGURA 54 Captación No. 4 de Virgen de las Nieves 137
FIGURA 55 Captación No. 5 de Virgen de las Nieves 138
FIGURA 56 Tanque rompe presión TRP-3 de Virgen de las Nieves.....138
FIGURA 57 Tanque rompe presión TRP-4 de Virgen de las Nieves.....139
FIGURA 58 Tanque rompe presión TRP-5 de Virgen de las Nieves.....139
FIGURA 59 Caja de desagüe CD-1 de la red principal de Virgen de las Nieves 140
FIGURA 60 Caja de desagüe CD-2 de la red principal de Virgen de las Nieves 140
FIGURA 61 Caja de desagüe CD-3 de la red principal de Virgen de las Nieves 141
FIGURA 62 Válvula de aire de la red principal de Virgen de las Nieves 141
FIGURA 63 Tanque rompe presión TRP-6 de Virgen de las Nieves.....142
FIGURA 64 Tanque rompe presión TRP-7 de Virgen de las Nieves.....142
FIGURA 65 Captación No. 7 de Virgen de las Nieves 143
FIGURA 66 Línea de conducción de Virgen de las Nieves 143

FIGURA 67 Válvula de aire de la red secundaria de Virgen de las Nieves 144
FIGURA 68 Tanque reservorio secundario de Virgen de las Nieves.....144
FIGURA 69 Desarenador de Virgen de las Nieves 145
FIGURA 70 Tanque reservorio principal de Virgen de las Nieves.....145
FIGURA 71 Cámara de unión de tuberías de los reservorios de Virgen de las Nieves.....145
FIGURA 72 Sistema de riego Virgen de las Nieves 147
FIGURA 73 Cámara de distribución de caudales de Virgen de las Nieves 148
FIGURA 74 Distribución de Virgen de las Nieves – canal de terrocemento y canal de tierra.....148
FIGURA 75 Método de cálculo de las perdidas en Wartergems 152
FIGURA 76 Modelación de captaciones en Watergems 153
FIGURA 77 Modelación de tanque rompe presiones. 154
FIGURA 78 Modelación de tanque rompe presiones solo con válvula.....154
FIGURA 79 Primer modelo en Watergems 155
FIGURA 80 Mapa de concesiones dentro del área de interés. 169
FIGURA 81 Mapa de la ubicación de las concesiones de la Cooperativa de Producción Virgen de las Nieves.....170

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 Elementos geométricos de las secciones del canal. 32
TABLA 2 Coeficientes de distribución de velocidades. 34
TABLA 3 Factores que favorecen la elección del método de riego 44
TABLA 4 Descripción de la información relevante revisada 63
TABLA 5 Coordenadas del proyecto de la Cuenca del Río Chibunga. 68
TABLA 6 Características de la Cuenca del Río Chibunga.....68
TABLA 7 Clasificación del clima según la precipitación. 74
TABLA 8 Parámetros del clima para Ecuador. 76
TABLA 9 Resumen de información de las estaciones meteorológicas analizadas. 78
TABLA 10 Resumen de datos de Estaciones Hidrológicas cercanas a la cuenca de estudio 82
TABLA 11 Clasificación de los grupos hidrológicos de suelo. 88
TABLA 12 Descripción de los grupos de suelo 89
TABLA 13 Números de curva CN II para áreas urbanas, suburbanas, rurales cultivadas y rurales.....90
TABLA 14 Número de curva con adaptaciones Témez, en condiciones medias de humedad. 92
TABLA 15 Resumen de características climáticas para Cropwat.....96
TABLA 16 Valores de Kc, coeficiente único del cultivo y alturas medias máximas de las plantas. 97
TABLA 17 Días de crecimiento del cultivo con sus periodos de siembra 97
TABLA 18 Profundidad máxima efectiva de raíces - fracción de agotamiento de los cultivos 98
TABLA 19 Coeficiente estacional de respuesta de productividad 99
TABLA 20 Litología y tipo de suelos de la Comunidad Virgen de las Nieves 100
TABLA 21 Humedades típicas para diferentes tipos de suelo.....100

TABLA 22 Resumen de las propiedades físicas para diferentes tipos de suelo. 101
TABLA 23 Características de las subcuencas de río Chibunga. 106
TABLA 24 Caudales obtenidos en base a datos del INAMHI. 125
TABLA 25 Número de curva de la cuenca del Chibunga. 126
TABLA 26 Cálculo de caudal por el método SCS 129
TABLA 27 Estaciones de referencia para el cálculo de caudales. 129
TABLA 28 Cálculo de caudal en estación de cierre H-785, por el método de transposición de caudales 130
TABLA 29 Comparación de caudales de la cuenca del Río Chibunga. 130
TABLA 30 Caudales en las captaciones. 132
TABLA 31 Ubicación geográfica de las captaciones y tanques rompe presiones. 133
TABLA 32 Distribución de riego por usuario 146
TABLA 33 Tramos del sistema de conducción para modelación en WATERGEMS 149
TABLA 34 Condiciones de la conducción en WATERGEMS 149
TABLA 35 Condiciones de la red de distribución - aspersores 151
TABLA 36 Caudales medidos en las captaciones 152
TABLA 37 Caudales requeridos para riego por aspersión 156
TABLA 38 Condiciones de la red de distribución - gravedad 157
TABLA 39 Resultados por junta para caudales estimados en captaciones del INAMHI – 5 aspersores 158
TABLA 40 Resultados por tubería para caudales estimados en captaciones del INAMHI – 5 aspersores 159
TABLA 41 Resultados por junta para primera campaña de aforos – 5 aspersores 160
TABLA 42 Resultados por tubería para primera campaña de aforos – 5 aspersores 161
TABLA 43 Resultados por junta para segunda campaña de aforos – 5 aspersores 162

TABLA 44 Resultados por tubería para segunda campaña de aforos – 5 aspersores.....163
TABLA 45 Medición de caudales en el predio de turno.....165
TABLA 46 Resultados de los RAC del estudio, mediante CROPWAT.....165
TABLA 47 Disponibilidad de agua VS Requerimiento de Agua, en el caso de estudio.....166
TABLA 48 Propuesta de implementación de línea de aspersores 168

RESUMEN

La gestión del recurso hídrico es considerada prioritaria en Ecuador, sin embargo, en la práctica, la falta de datos hidrometeorológicos, de recursos y de decisión política necesarias, dificultan la ejecución de estudios que permitan optimizar los sistemas de riego. Situación que se presenta especialmente en las zonas rurales del país, como sucede en la Comunidad Compañía Obraje, en el Sistema de riego Virgen de las Nieves, donde, la distribución ineficaz y las estructuras hidráulicas deficientes, generan problemas para la sostenibilidad de los sistemas de riego.

La aplicación de estrategias es necesaria para garantizar el mantenimiento de las estructuras hidráulicas, el diseño apropiado de los sistemas y la distribución objetiva del recurso hídrico, considerando los requerimientos hídricos de los cultivos propios de la zona. El presente proyecto tiene como finalidad analizar el funcionamiento del sistema de riego Virgen de las Nieves", comunidad Compañía Obraje, cantón Colta; mediante la caracterización de la cuenca de estudio y la determinación de la disponibilidad de recurso hídrico a través de un análisis hidrológico y campañas de aforos. Para optimizar el sistema de riego, se utiliza el software CROPWAT para determinar el requerimiento de agua de los cultivos propios de la zona, como son papas, zanahoria, cebolla y pasto de pastoreo. Además, el software WATERGEMS permite analizar el funcionamiento del sistema de riego actual.

Se realizan tres modelos, el primero con los caudales obtenidos mediante el método de trasposición de caudales, usando como base los datos del INAMHI; el segundo modelo utilizando los caudales máximos aforados y el tercero con los caudales mínimos aforados. Se verifica que el sistema actual se encuentra operativo en las tres condiciones, tanto en el tramo de conducción como en la línea de distribución de riego por aspersión. Sin embargo, en el sistema de riego por gravedad, la falta de mantenimiento en los canales de terrocemento y de tierra generan pérdidas por infiltración de hasta el 40% en el caso de estudio analizado.

El Sistema de Riego Virgen de las Nieves cuenta con un caudal disponible aforado en el tanque de reserva de 7.41 l/s y 9.75 l/s para los periodos seco y húmedo, respectivamente. En el riego por gravedad, se presenta un 50% de exceso en la dotación de agua que requiere el cultivo de papa analizado, que corresponde a 83.8 mm cada siete días.

Se presentan recomendaciones para la optimización del sistema mediante una redistribución de los turnos, considerando el máximo requerimiento de agua del cultivo más demandante. Asimismo, se plantea la implementación de una línea de aspersión con 30 aparatos adicionales a la línea de distribución por gravedad en el turno diurno.

Palabras clave: Watergems, sistemas de riego, optimización de sistemas

ABSTRACT

Water resource management is considered a priority in Ecuador, however, in practice, the lack of hydrometeorological data, resources and the necessary political decisions make it difficult to carry out studies to optimize irrigation systems. This situation is present especially in rural areas of the country, as happens in the Obraje Company Community, in the “Virgen de las Nieves” irrigation system, where inefficient distribution and deficient hydraulic structures generate problems for the sustainability of irrigation systems.

The application of strategies is necessary to guarantee the maintenance of hydraulic structures, the appropriate design of the systems and the objective distribution of water resources considering the water requirements of the crops grown in the area. The purpose of this project is to analyze the operation of the “Virgen de las Nieves" irrigation system, Obraje Company community, Colta canton; by characterizing the study basin and determining the availability of water resources through a hydrological analysis and gauging campaigns. To optimize the irrigation system, CROPWAT software was used to determine the water requirements of the crops grown in the area, such as potatoes, carrots, onions and pasture grass. In addition, the WATERGEMS software is used to analyze the performance of the current irrigation system.

Three models are made, the first one with the flow rates obtained by the flow transposition method, using INAMHI data as a basis, the second model using the maximum flows measured and the third one with the minimum flows measured. It is verified that the current system is operational in the three conditions, both in the conduction section and in the sprinkler irrigation distribution line. However, in the gravity irrigation system, the lack of maintenance in the terrocement and earthen channels generates infiltration losses of up to 40% in the case study analyzed.

The “Virgen de las Nieves” irrigation system has an available flow gauged in the reserve tank of 7.41 l/s and 9.75 l/s for the dry and wet periods, respectively. In the

gravity irrigation system, there is a 50% excess in the water supply required by the potato crop analyzed, which corresponds to 83.8 mm every seven days.

Recommendations are presented for the optimization of the system through a redistribution of the shifts, considering the maximum water requirement of the most demanding crop. Likewise, the implementation of a sprinkler line with 30 additional devices to the gravity distribution line is proposed in the day shift.

Keywords: Watergems, Irrigation Systems, systems optimization

CAPITULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Actualmente en Ecuador, la gestión del recurso hídrico es considerada como una tarea prioritaria y permanente que debe realizarse para poder garantizar la conservación y tener un aprovechamiento adecuado. Sin embargo, la falta de información hidrometeorológica, el poco conocimiento de la organización y estructura social, política y económica de país, se han tornado en obstáculos considerables para alcanzar este objetivo (SENAGUA, 2011). Adicionalmente, el Ecuador carece de estrategias estatales para el desarrollo del riego pese a que cerca del 82% del consumo total de agua en el país es para uso agrícola y el resto se distribuye en uso doméstico (12.3%) e industrial (5.6%) (Zapata y Gasselin, 2005).

Existen problemas en la gestión del riego debido a varios factores como la escasa disponibilidad del recurso hídrico debido a condiciones naturales, contaminación, falta de obras de almacenamiento y regulación, y sobreestimación de los caudales disponibles (CNRH, 2002). Todo esto sumado al acceso inequitativo debido a la estructura agraria que concentra las tierras y por ende la cantidad de agua de las concesiones (Chiriboga, 2004).

Además, el bajo nivel de tecnificación produce una baja eficiencia en el uso de agua de riego y degradación en los suelos (CNRH, 2002); las dificultades organizativas en la administración y control de los sistemas contribuyen en la problemática. La gestión del riego se plantea como una estrategia clave para la lucha contra la pobreza en los sectores populares del campo, quienes viven una situación precaria con una distribución de los recursos inequitativa debido a su organización, generando riesgos relacionados con la producción y comercialización de sus productos (Zapata y Gasselin, 2005).

En la provincia de Chimborazo se utiliza el 79% del caudal total para riego de acuerdo al Inventario de Recursos Hídricos del Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Chimborazo (GADPCH) del 2008, lo que muestra la gran importancia de la actividad agrícola y la cantidad de recurso hídrico que se requiere para el mismo (PPRDCH, 2018). El cantón Colta ubicado al noroeste de la provincia de Chimborazo usa un 7% del agua para riego del total de la provincia, y en su mayoría está constituido por sistemas comunitarios pequeños (PPRDCH, 2018). En el noroccidente del cantón se ubica el territorio de La Unión de Organizaciones de Desarrollo Integral de Cicalpa (UODIC) que tiene una población indígena con raíces del pueblo Puruha formada por 16 organizaciones comunitarias, donde su principal actividad económica es la producción agrícola (Pucha, 2013).

Las comunidades que forman parte de la UODIC presentan una alta migración hacia los centros poblados debido a la baja rentabilidad del tipo de agricultura que utilizan y a la limitación del recurso que solo está disponible en época lluviosa. (Pucha, 2013). Dentro de la comunidad Compañía Obraje, se encuentra el sistema de riego “Virgen de las Nieves”, donde existe una limitación en las áreas de cultivo debido a la ineficaz distribución de recurso disponible y a las estructuras deficientes que ya cumplieron su vida útil y comprometen la integridad del sistema de distribución. Todos estos factores han afectado el aprovechamiento del recurso hídrico para cubrir con la demanda de todas las áreas de cultivo en esa zona.

Este proyecto de titulación tiene como objeto realizar: a) un diagnóstico hidrológico para verificar las fuentes de agua y su disponibilidad a lo largo del año, b) un levantamiento de la infraestructura hidráulica existente, c) la aplicación del paquete computacional WATERGEMS para evaluar el estado actual del sistema y verificar posteriormente, con las demandas reales de los cultivos, el funcionamiento del mismo, y d) la aplicación del paquete computacional CROPWAT para determinar la necesidad de agua de los cultivos existentes en la zona de estudio. Todos estos componentes servirán para realizar la evaluación del funcionamiento del sistema de distribución de agua para el sistema de riego “Virgen de las Nieves”.

Adicionalmente, se determinará las pérdidas del sistema y se propondrán alternativas de optimización en función del tipo de cultivo, disponibilidad del agua y distribución eficiente del recurso hídrico.

1.2 JUSTIFICACIÓN

1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

El agua es un recurso indispensable para la humanidad y que tradicionalmente su suministro ha estado encaminado para abastecer todas las necesidades de agua de los usuarios (Medellín-Azuara et al., 2007). El incremento en los costos para el abastecimiento y así como la escasez de fuentes de agua en ciertas áreas, ha mostrado que es indispensable el desarrollo de sistemas de abastecimiento de agua sostenibles. En este contexto, aparece la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH), que procura mantener un equilibrio entre la oferta y la demanda de agua, considerando su disponibilidad, mediante sistemas convencionales y no convencionales e integrando aspectos cuantitativos y cualitativos (Molinos-Senante et al., 2013).

Las optimizaciones de los sistemas de riego se han realizado alrededor del mundo mediante diferentes estrategias, entre las que están: el agrupamiento de cultivos en base a las necesidades de riego, mejoramiento de los tiempos óptimos de regadío, identificar problemas de conducción y de operación de aguas para riego en comunidades, cuantificar las pérdidas de agua a través de soluciones de ingeniería o cambios en las formas de manejo del agua (CIREN, 2007).

Según Nieto y otros (2018), el balance mensual entre la disponibilidad de agua y la cantidad que se requiere para los cultivos, manifiesta que tanto el déficit como el exceso de agua de riego en las Unidades de Producción Agropecuaria provocan ineficiencias en el aprovechamiento de este recurso escaso. Además, existe una influencia negativa debido a la modalidad del reparto que no considera los volúmenes de agua requeridos en las comunidades para la entrega de las

adjudicaciones, que no obedecen a factores técnicos, ni a la disponibilidad de tierra regable.

La agricultura está identificada como una de las áreas que requiere una gran demanda de agua, uno de los problemas más significativos que presenta es la cantidad de agua desaprovechada especialmente cuando las obras de conducción no son revestidas y cuando se utilizan sistemas de riego masivo tradicionales como inundación y/o canales de agua operados manualmente. Esto ha motivado la investigación e implementación de sistemas de riego tecnificados, que provean un suministro adecuado de agua y así, optimizar el proceso de aplicación de agua en zonas agrícolas (Collado y Saez, 2017). Además, en estudios previos se concluyó que existe déficit en la superficie regada porque no se satisfacen las necesidades hídricas de los cultivos, esto causado por el reparto “equitativo” del caudal (Pazmiño, 2016).

Los resultados de estos estudios reflejan el déficit hídrico presente en la mayoría de comunidades en el Ecuador. Los sistemas utilizados no cuentan con reservas para cubrir la variabilidad estacional. Adicionalmente, existe deficiencia en los procesos constructivos utilizados y en el mantenimiento a las estructuras hidráulicas. Del mismo modo, se presenta una falta de distribución del recurso según la superficie y el tipo de cultivo, lo que contribuyen al déficit del recurso hídrico.

1.2.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

La aplicación de balances hídricos permite cuantificar las distintas variables hidrológicas en una cuenca: precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía. Más aún, la obtención de un balance a escala mensual brinda información detallada de la variación de los almacenamientos, conociendo así el comportamiento en la cuenca. Sin embargo, no siempre es posible tener la información suficiente que permita tales balances, por lo que el uso de modelos hidrológicos permite de alguna manera solventar parcialmente con esta escasez de datos y avanzar con los objetivos planteados en las distintas investigaciones (Vargas et al., 2012).

Este proyecto iniciará con la recopilación de información en la comunidad Compañía Obraje perteneciente al cantón Colta, provincia de Chimborazo, se la realizará mediante trabajo de campo y oficina para conocer la organización y la distribución del recurso hídrico, la infraestructura hidráulica existente y los usos finales del agua. Adicionalmente, se recopilará la información pública oficial hidrometeorológica e hidrológica de fuentes oficiales como: Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), Sistema Nacional de Información (SNI), bases de datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Chimborazo y Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Colta, la cual se correlacionará con datos tomados en campo.

La evaluación de la infraestructura hidráulica existente se realizará mediante el software WATERGEMS de forma que se pueda conocer el funcionamiento actual del sistema de riego y mediante el software CROPWAT se busca determinar el requerimiento de agua de los cultivos. Estas demandas calculadas servirán para realizar la optimización, la que se verificará con WATERGEMS y de esta manera se podrá proponer estrategias que satisfagan las necesidades para los diferentes usos del recurso hídrico en la comunidad.

WATERGEMS es un software que utiliza una multiplataforma con integración a sistemas de información geográfica (SIG) para realizar modelación hidráulica y de calidad de los sistemas de distribución (Bentley, 2012). Mientras que, el CROPWAT es un programa informático creado por la FAO para realizar el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos, en función de los datos de las condiciones climáticas, del tipo de suelo y del cultivo. Tanto los modelos como la información que se levantará en campo servirán como insumos para analizar y realizar recomendaciones respecto a una distribución efectiva del recurso hídrico.

1.2.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Uno de los desafíos más importantes en la actualidad es tener una asignación apropiada del agua disponible, ya que la competencia por su uso se ha intensificado

en diferentes demandas como: la agrícola, urbana, industrial y ambiental. En función de este crecimiento de las necesidades, se busca desarrollar modelos de optimización con la finalidad de mejorar la gestión y planificación de los recursos hídricos (Molinos et al., 2013).

Ecuador tiene una productividad agropecuaria baja comparada con otros países de América Latina; por ejemplo, al comparar los rendimientos de papa, maíz y arroz en cáscara se tiene que estos son inferiores a la media mundial. Esto implica que se pierde la oportunidad de utilizar adecuadamente sus recursos naturales renovables y sus capacidades humanas, que al final impiden avanzar en la lucha contra la pobreza (Larrea y Sosa, 2014).

En este contexto, el proyecto propuesto busca optimizar el sistema de riego "Virgen de las Nieves" de forma que se pueda ampliar las zonas cultivables mediante el uso eficiente del recurso hídrico, la disminución de las pérdidas del sistema y el planteamiento de un sistema de distribución en función de las limitaciones técnicas, sociales y económicas, esto con la finalidad de mejorar la rentabilidad del sector agrícola y por tanto contribuir en la disminución del índice de migración de este sector indígena.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una optimización del Sistema de Riego "Virgen de las Nieves" de la comunidad Compañía Obraje de acuerdo con la disponibilidad del recurso, superficie de producción y tipo de cultivo, mediante la aplicación de los modelos CROPWAT y WATERGEMS.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la cuenca y determinar las características de la infraestructura hidráulica existente, mediante trabajo de gabinete y visitas de campo al sistema de riego "Virgen de las Nieves".

- Realizar un análisis hidrológico mediante la caracterización de la cuenca para determinar la cantidad de recurso hídrico disponible.
- Determinar el requerimiento de agua de los cultivos mediante el software CROPWAT.
- Realizar un análisis hidráulico mediante el software WATERGEMS para realizar una propuesta de optimización del sistema de riego “Virgen de las Nieves”

1.4 ALCANCE

Este proyecto busca obtener la caracterización de la cuenca de estudio, mediante la recolección de datos en sitio con campañas de muestreo. Adicionalmente, establecer las variables hidrometeorológicas mediante revisión de la información disponible del INAMHI y metodologías teóricas, con la finalidad de analizar y determinar la disponibilidad del recurso hídrico en la zona de estudio.

Además, en el sistema de riego “Virgen de las Nieves” se realizará el levantamiento de la infraestructura hidráulica existente para su posterior modelación y evaluación del sistema de riego. La información de los cultivos más representativos de la zona y de los resultados de las variables meteorológicas se utilizará para la determinación del requerimiento de agua, permitiendo de esta manera brindar propuestas y recomendaciones para la optimización del sistema de riego.

CAPÍTULO 2

2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 CONCEPTOS GENERALES

2.1.1.1 Flujo en Tuberías

El método más común, según Crane & Valfisa (1989), para conducir fluidos entre dos puntos es realizarlo a través de un sistema de tuberías. Las tuberías que se emplean generalmente son las de sección circular, esto ya que presenta una mayor resistencia estructural, así como una mayor sección transversal.

- **Flujo laminar y Flujo turbulento:** Existen dos tipos de flujos para fluidos en tuberías. En el flujo laminar, las láminas del fluido se desplazan en líneas rectas y paralelas con una velocidad media, mientras que, a mayores velocidades, estas se dispersan a través de toda la corriente y hay un movimiento irregular, lo que se conoce como flujo turbulento (Crane & Valfisa,1989).

- **Distribución de velocidades en tuberías:** La velocidad media de una sección transversal se encuentra dada por la ecuación de continuidad de flujo estacionario:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{2.1}$$

Donde:
$A = área$
$v = velocidad$

Según Crane & Valfisa (1989), el régimen de flujo en tuberías depende del diámetro de tubería, y de las características del fluido, siendo estas, densidad, velocidad y viscosidad. El número de Reynolds es el parámetro que incluye las 4 variables y que va a permitir determinar el tipo de flujo y está determinado por:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{2.2}$$

$Donde$:
$Re = número\ de\ Reynolds$
$\rho = densidad\ del\ fluido\ (kg/m^3)$
$v = velocidad\ (m/s)$
$D = diametro\ de\ la\ tubería\ (m)$
$\mu = viscosidad\ del\ fluido\ (Pa * s)$

Citando a Crane & Valfisa (1989), se señala que cuando el número de Reynolds es menor a 2000, se tiene un régimen laminar, mientras que si este valor es superior a 4000 se presenta un régimen turbulento en el flujo. Si la sección transversal no es circular, en el cálculo del número de Reynolds, el D, se reemplazará por el valor diámetro equivalente, que es igual a cuatro veces el radio hidráulico, sabiendo que este R_h, es la relación entre el área de la sección mojada y el perímetro mojado.

- **Ecuación de energía:** representa la conservación de la energía de un flujo en una tubería. La energía total en un punto sobre el plano horizontal de referencia, es la sumatoria de alturas geométrica, producida por la presión y la causada por la velocidad, es decir:

$$H = z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{{v_1}^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{{v_2}^2}{2g} \tag{2.3}$$

$Donde$:

$z = altura\ sobre\ el\ nivel\ de\ referencia\ (m)$
$P = presión\ manometrica\ \ (N/m^2)$
$\rho = densidad\ del\ fluido\ (kg/m^3)$
$g = aceleración\ de\ la\ gravedad\ (9.81\ m/s^2)$
$v = velocidad\ (m/s)$

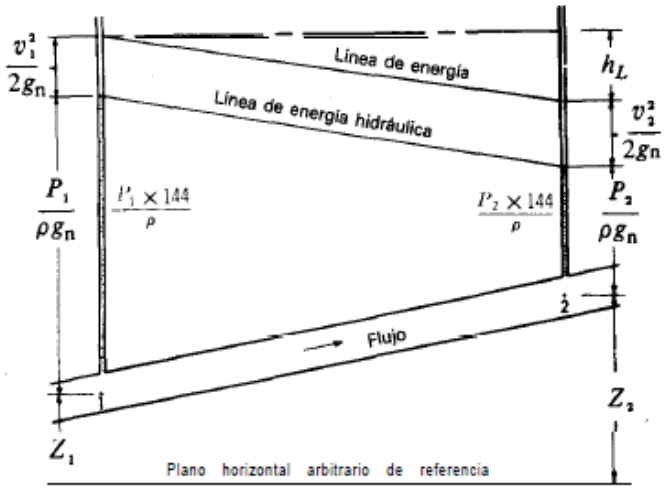


FIGURA 1 Balance de energía entre dos puntos de un fluido.
Fuente: (Crane & Valfisa,1989)

- **Pérdida de carga en tuberías***:* es producida debido a la fricción entre las partículas y a la fricción entre el fluido y las paredes de la tubería. Se tienen diferentes ecuaciones para calcular estas pérdidas:

Ecuación de Darcy - Weisbach: se utiliza en el caso del flujo laminar y turbulento en una tubería, y permite el cálculo de las pérdidas de carga en función de la velocidad y del caudal:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} = f * \frac{8}{g*\pi^2} * \frac{Q^2*L}{D^5} \tag{2.4}$$

Donde:
$h_f = pérdida\ de\ carga\ debido\ a\ la\ fricción\ (m)$
$f = factor\ de\ fricción\ de\ Darcy$ *(adimensional)*
$L = longitud\ de\ la\ tubería\ (m)$
$D = diámetro\ de\ la\ tubería\ (m)$
$v = velocidad\ media\ (m/s)$
$Q = caudal\ (m^3/s)$
$g = aceleración\ de\ la\ gravedad\ (9.81\ m/s^2)$

Para tuberías lisas, cuando $750 < R < 25000$ puede expresarse, f, mediante la ecuación de Blasius:

$$f = \frac{0.223}{R^{0.25}} \tag{2.5}$$

Ecuación de Hazen – Williams, en función de la velocidad del flujo circulante, es:

$$h_f = L * \left(\frac{v}{0.355 * C * D^{0.63}}\right)^{1.852} \quad (2.6)$$

$Donde$:
$h_f = pérdida\ de\ carga\ (m)$
$L = longitud\ de\ la\ tubería\ (m)$
$v = velocidad\ media\ (m/s)$
$C = coeficiente\ de\ pérdida\ de\ Hazen - William$
$D = diámetro\ de\ la\ tubería\ (m)$

2.1.1.2 Redes de conducción

- **Redes de Tuberías:** De acuerdo a Sotelo (1997), se pueden tener dos tipos de redes, abiertas o cerradas, que son un conjunto de tubos con diferentes nudos que se pueden ir armando y cuyos extremos libres permiten el ingreso y salida de un fluido.

  - **Redes abiertas:** Se da cuando una tubería se ramifica sucesivamente sin que se tengan secciones que se intersequen (*CONAGUA, 2019*). El análisis de sistemas de tuberías se realiza utilizando las ecuaciones de continuidad y energía, tomando en cuenta las perdidas por fricción y locales.

    Para el dimensionamiento de las tuberías de las redes abiertas se debe considerar:

    - El caudal debe distribuirse de manera uniforme a lo largo de la longitud de cada tramo.
    - La pérdida de carga en un ramal se calcula usando el caudal del tramo.
    - Los caudales puntuales deben ser considerados un nudo.

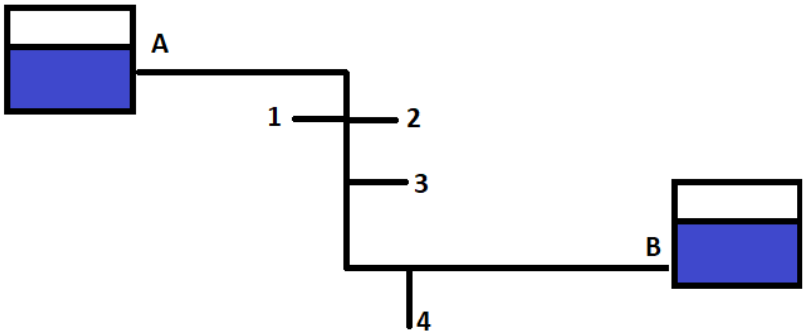


FIGURA 2 Redes abiertas
Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

- **Redes cerradas:** *"Se la conoce aquella en la cual los conductos que la componen se cierran formando círculos, para la aplicación de estas redes. Se tienen dos tipos de ecuaciones: la de nudo y de perdida de energía" (Sotelo, 1997).* El análisis de estos sistemas de tuberías se realiza utilizando las ecuaciones de conservación de masa y conservación de energía para cada tubo y para cada circuito *(CONAGUA, 2019).*

- **Canales abiertos**: los canales abiertos son zanjas que pueden ser naturales o artificiales, por las cuales fluye el agua con una superficie libre. Los canales artificiales son construidos en diferentes materiales, se diseñan y utilizan para cumplir con los requisitos específicos (Chow, 1992).

FIGURA 3 Flujo en canales abiertos

Fuente: Chow, 1992

- **Tipos de flujo en canales:** el flujo en los canales considerando el cambio de altura de flujo en relación con el tiempo y el espacio se clasifica en flujo permanente y no permanente. Cada uno de estos se clasifica en uniforme o gradualmente/rápidamente variado (Chow, 1992).

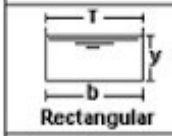
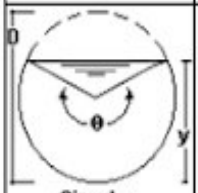
- **Sección de canal:** se refiere al área transversal que es perpendicular a la dirección del flujo. (Chow, 1992).

- **Elementos geométricos de una sección de canal:** son propiedades de una sección aquellas que consideran la geometría del canal y la altura/profundidad de flujo (Chow, 1992). A continuación, se definen varios elementos geométricos:

  - La profundidad de flujo, y, es la altura que alcanza el flujo medido desde el punto más bajo del canal hasta la superficie libre (SL).
  - El nivel es la distancia en el eje vertical desde el punto de referencia hasta la SL;
  - El ancho superficial, T, es la distancia horizontal en la SL del canal;
  - El área mojada, A, es la sección transversal del flujo;

- El perímetro mojado, P, es la longitud transversal que la línea de contacto del canal con el flujo;
- El radio hidráulico, R, es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado;

TABLA 1 Elementos geométricos de las secciones del canal.

Sección	Area hidráulica A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta-\text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1-\frac{\text{sen}\,\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$(\text{sen}\frac{\theta}{2})D$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$
Parabólica	$2/3\ Ty$	$T+\frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Fuente: Chow, 1992

- **Distribución de velocidades en una sección de canal***:* las velocidades en un canal no se encuentran distribuidas uniformemente, lo que se genera por la fricción con la superficie del canal y la superficie libre. La velocidad máxima suele presentarse generalmente 0.05 a 0.25 de la superficie libre; las velocidades máximas se encuentran a una mayor profundidad en los bordes del canal (Chow, 1992).

La distribución de velocidades depende, además, de otros factores como secciones irregulares, rugosidad del material, y presencia de curvas. Producto de estas afectaciones se conoce que la altura de la velocidad en el canal abierto, suele ser mayor que el calculado con la expresión $v^2/2g$, siendo v la velocidad media.

La altura de la velocidad real considerando el principio de energía se calcula con $\alpha v^2/2g$, donde α se conoce como coeficiente de energía o coeficiente de Coriolis, según Chow (1992). Los datos experimentales indican que el valor de α varía desde 1.03 hasta 1.36 para canales prismáticos aproximadamente rectos. Por lo general, el valor es alto para canales pequeños y bajo para corrientes grandes con profundidad considerable. El cálculo del momento del flujo en canales abiertos, es afectado por la distribución no uniforme de la velocidad por lo que, el momento por unidad de tiempo del fluido se obtiene por $\beta wQv/g$, siendo β el coeficiente de momento o de Boussinesq. Este, según Chow (1992) puede variar desde 1.01 hasta 1.12 para canales prismáticos aproximadamente rectos.

Los dos coeficientes de distribución de velocidades son siempre algo mayores que el valor límite de la unidad, para el cual la distribución de velocidades es estrictamente uniforme a través de la sección del canal. Para canales de sección transversal regular y alineamiento más o menos recto, el efecto de la distribución no uniforme de velocidades en el cálculo de la altura de velocidad y el momentum es pequeño, especialmente en comparación con otras incertidumbres involucradas en el cálculo. Por consiguiente, a menudo los coeficientes se suponen iguales a la unidad. Para propósitos prácticos, Kolupaila propuso los valores mostrados en la TABLA 2 (Chow, 1992).

TABLA 2 Coeficientes de distribución de velocidades.

CANALES	α			β		
	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
Rectangular, canaleta, vertedero	1.15	1.10	1.20	1.05	1.03	1.07
Torrente y corriente natural	1.30	1.15	1.50	1.10	1.05	1.17
Ríos bajo cubierta de hielo	1.50	1.20	2.00	1.17	1.07	1.33
Valles de ríos inundados	1.75	1.50	2.00	1.25	1.17	1.33

Fuente: (Chow, 1992)

- **Distribución de presión en una sección de canal:** la distribución es lineal de acuerdo con la ley hidrostática de distribución de presiones que se emplea únicamente cuando no se presentan componentes de aceleración el plano transversal.

- **La ecuación de energía**: La energía total del agua que es la sumatoria de la altura en metros de agua: del nivel de referencia, por presión y por velocidad.

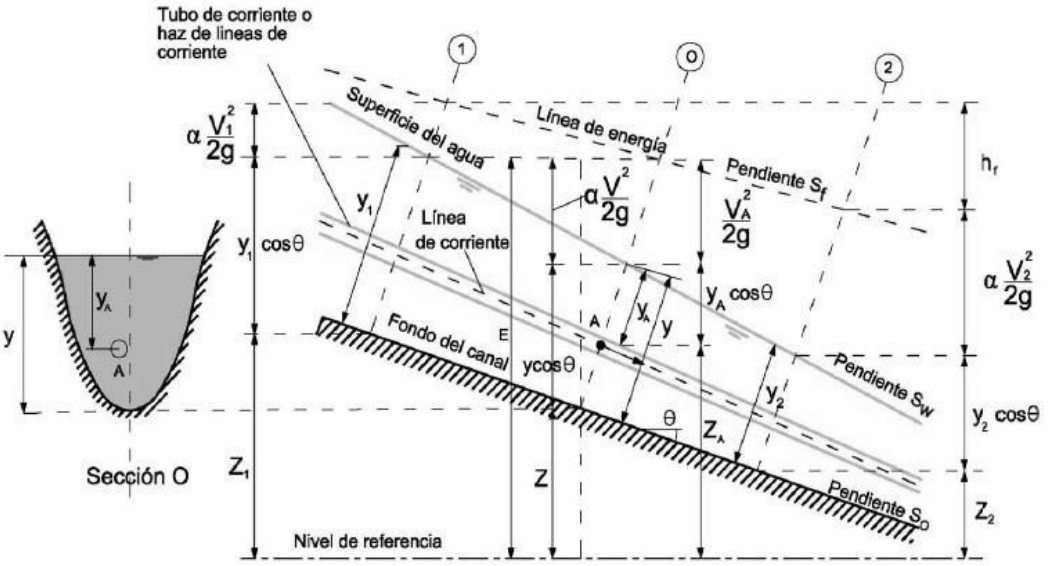


FIGURA 4 Energía en canal abierto para flujo gradualmente variado
Fuente: Chow, 1992

Con respecto al plano de referencia, la altura total H de una sección O, puede escribirse:

$$E = z_A + y_A * \cos\theta + \frac{{v_A}^2}{2g} \tag{2.7}$$

$Donde$:

$z_A = altura\ del\ punto\ A\ \ sobre\ el\ nivel\ de\ referencia\ (m)$
$y_A = profundidad\ del\ punto\ A\ bajo\ la\ superficie\ del\ agua\ \ (m)$
$\theta = ángulo\ de\ la\ pendiente\ de\ la\ base\ del\ canal$
$g = aceleración\ de\ la\ gravedad\ (9.81\ m/s^2)$
$v_A = velocidad\ (m/s)$

- **La energía específica y flujo crítico:** la energía especifica se define como la energía por peso de agua medida desde el fondo, con $z = 0$, para un canal con una pendiente baja y $\alpha = 1$ (Chow, 1992):

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \tag{2.8}$$

$Donde$:

$y = altura\ sobre\ el\ nivel\ de\ referencia\ (m)$
$g = aceleración\ de\ la\ gravedad\ (9.81\ m/s^2)$
$v = velocidad\ (m/s)$

El flujo crítico se presenta cuando el número de Froude es igual a uno, este número representa la relación entre las fuerzas inerciales y gravitatorias en un flujo. Además, se presenta cuando la energía específica para un caudal es mínima, con $v = Q/A$ y que en un canal de pendiente baja, $\alpha = 1$:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \tag{2.9}$$

- **Flujo uniforme.** tiene las siguientes características:

1) Se mantienen constantes: La profundidad, el área mojada, la velocidad y el caudal en todas las secciones (Chow, 1992);
2) Se mantienen paralelas las líneas de energía, superficie de agua y fondo del canal, las pendientes son iguales en los tres casos, o $Sf = Sw = So = S$ (Chow, 1992).

Cuando se mantiene un equilibrio entre las fuerzas gravitacionales con la resistencia que se presenta en el flujo que corre agua abajo, se considera que se tiene un flujo uniforme.

La velocidad media de un flujo uniforme turbulento en canales abiertos se representa, aproximadamente por la ecuación de flujo uniforme, así:

$$v = CR^x S^y \tag{2.10}$$

$Donde$:
$v = velocidad\ media\ (pies/s)$
$R = radio\ hidraulico\ (pies)$
$S = pendiente\ de\ la\ energia$
$x, y = exponentes$
$C = factor\ de\ resistencia\ al\ flujo$

$* \ equivalencia\ de\ unidades$: $1pie = 0.3048\ m$

Además, se puede utilizar por su simplicidad la ecuación de Manning:

$$v = \frac{1.49}{n} * R^{2/3} S^{1/2} \tag{2.11}$$

$Donde$:
$v = velocidad\ media\ (pies/s)$
$R = radio\ hidráulico\ pies$
$S = pendiente\ de\ la\ linea\ de\ energía$
$n = coeficiente\ de\ rugosidad, n\ de\ Manning$

$* \ equivalencia\ de\ unidades$: $1pie = 0.3048\ m$

- **Flujo gradualmente variado**: se produce cuando existen variaciones graduales en la profundidad a lo largo del canal (Chow, 1992), se establecen dos condiciones:

1) Las características hidráulicas de flujo permanecen constantes en el intervalo de tiempo, y,
2) Las líneas de corriente son paralelas, por lo que se considera que las presiones tienen una distribución hidrostática bajo las siguientes suposiciones:

- La pérdida de altura en una sección es equivalente a un flujo uniforme;
- La pendiente del canal es baja, lo que implica que la profundidad del flujo es independiente de la dirección vertical o normal, el factor de corrección de presiones $\cos\theta$ es uno y además no existe atrapamiento de aire.
- El canal tiene una forma prismática;
- La distribución de velocidad es fija en el canal;
- La conductividad K, y el factor de sección, Z, son funciones exponenciales de la profundidad del flujo.
- El coeficiente de rugosidad no depende de la profundidad del flujo y es constante en el canal.

- **Flujo espacialmente variado**: su flujo no es uniforme debido al incremento o disminución de agua en el canal, estas adiciones o extracciones provocan perturbaciones en la energía del flujo (Chow, 1992). Los dos tipos de flujo espacialmente variados son: con caudal creciente y con caudal decreciente y funciona bajo las siguientes suposiciones:

1. *"El flujo es unidireccional."*
2. *"La distribución de velocidades es constante y uniforme";*
3. *"La presión en el flujo es hidrostática";*
4. *"La pendiente del canal es muy pequeña";*
5. *"Se utiliza la ecuación de Manning";*
6. *"El efecto del atrapamiento de aíre es insignificante"*

- **Flujo rápidamente variado***:* las líneas de corriente presentan curvaturas pronunciadas, las cuales pueden ser abruptas provocando una rotura en el flujo y de esta manera turbulencia, el ejemplo más claro es el resalto hidráulico (Chow, 1992). Las características de este flujo son:

1. La distribución de presiones no puede considerarse como hidrostática debido a que la curvatura del flujo es muy pronunciada.
2. La variación rápida en el flujo se da en un tramo corto, donde la fricción en los bordes es muy pequeña, casi insignificante.
3. Cuando este flujo sucede en una estructura donde se presenta una transición abrupta, sus características físicas dependen principalmente de la geometría de la estructura y del estado del flujo.
4. Los cambios rápidos en el área mojada, no permiten que los coeficientes de distribución de velocidades α y β se puedan estimar con exactitud y tienden a ser mayores a uno.
5. En este flujo se presentan zonas de separación, remolinos y corrientes secundarias que distorsionan la distribución de velocidades real, para estos casos se maneja el criterio de un flujo confinado entre una o más zonas de separación y no por fronteras sólidas.

2.1.1.3 Variables hidrológicas

- **Precipitación***,* incluye la lluvia, la nieve y otros procesos a través de los que se tiene la caída de agua sobre la superficie terrestre. La formación de la precipitación implica que una masa de agua se eleve a la atmósfera y se enfríe condensando su humedad, para lo que se tienen tres mecanismos: 1) el aire es caliente se eleva sobre aire frío a lo que se le denomina elevación frontal; 2) la masa de aire se eleva sobre una cadena montañosa a lo que se le conoce como elevación orográfica; y 3) el aire es impulsado hacia arriba por una acción convectiva, como ilustra la siguiente figura:

FIGURA 5 Ciclo hidrológico.
Fuente: Chow et al, 1994

La precipitación es variable en el tiempo y espacio, conforme con el patrón general de circulación atmosférica y con factores locales.

- **Evaporación**, depende de dos factores: el suministro de energía que tenga calor latente de vaporización y la habilidad de transportar el vapor, que está influenciado por la velocidad del viento en la superficie y por el gradiente de humedad. La principal fuente de energía calórica es la radiación solar (Chow et al, 1994).

Se utilizan las ecuaciones de continuidad y energía, considerando como base un tanque de evaporación de forma circular lleno de agua. La tasa de disminución de la superficie de agua representa la tasa de evaporación (FIGURA 6).

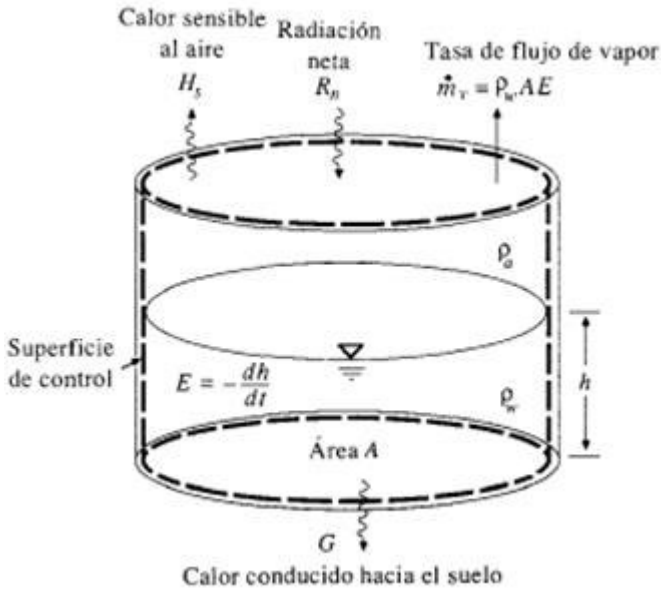


FIGURA 6 Volumen de control para determinar las ecuaciones de evaporación.

Fuente: Chow et al, 1994

- **Evapotranspiración:** es la suma de evaporación producida por la transpiración de la vegetación y desde la superficie del suelo. Los factores que afectan la evaporación son los que dominan la evapotranspiración, sin embargo, hay que considerar además la provisión de humedad a la superficie de evaporación. La tasa de evaporación disminuye cuando el suelo se seca (Chow et al, 1994). Para determinar la tasa de evapotranspiración se utilizan los métodos de la evaporación, pero se debe considerar, además, las condiciones de vegetación y de suelo.

- **Infiltración:** es un proceso que permite que el agua se introduzca en el suelo, algunos factores que contribuyen a la tasa de infiltración son: cobertura vegetal, propiedades del suelo (porosidad, conductividad hidráulica, contenido de humedad). La infiltración únicamente se puede estimar mediante ecuaciones matemáticas ya que las propiedades del suelo cambian en función de su contenido de humedad (Chow et al, 1994).

La tasa de infiltración f (in/h – cm/h) es la velocidad con la que el agua ingresa al suelo en la superficie de este.

Horton desarrollo una de las primeras ecuaciones para describir la infiltración (1933), y determinó que se tiene una tasa inicial fo, que va decreciendo exponencialmente hasta que alcanza una tasa contante fc

$$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \tag{2.12}$$

$Donde$:
$k = es\ la\ constante\ de\ decaimiento\ (T^{-1})$

- **Escorrentía:** es el flujo de agua que no se infiltra ni se retiene en la superficie terrestre y que recorre la superficie de la cuenca hasta su salida, esto suponiendo que se tiene un flujo superficial hortoniano (Chow et al, 1994).

  Las variables que afectan la escorrentía son: tipo, capacidad de infiltración y humedad del suelo, precipitación, extensión y tipo de cobertura del suelo.

2.1.2 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE RIEGO

2.1.2.1 Riego

El riego por definición, se refiere a la provisión de agua aplicada de forma artificial sobre el suelo con la finalidad de mantenerlo hidratado. Tiene dos funciones principales, la primera es suministrar la humedad esencial para el normal crecimiento de un cultivo y la segunda es lavar o diluir las sales en el suelo para mantener productiva la región (García y Briones, 2015).

Los sistemas de riego se componen de una serie de estructuras que permiten la captación, conducción, almacenamiento y distribución de agua, desde un afluente hacia los terrenos que lo requieren. En zonas geográficas donde las lluvias son escasas y los periodos secos son prolongados, el uso de estos sistemas permite cultivar durante todo el año sin limitarse a los periodos estacionales.

2.1.2.2 Tipos de riego

De acuerdo con Pereira y Trout (1999), se puede clasificar los métodos de riego de la siguiente manera:

1. Riego de superficie: conocido también como riego a gravedad, comprende el riego por inundación, en canteros tradicionales, por surcos, riego por infiltración en surco o fajas y el riego por escorrentía libre.

    - Por surcos: es el más utilizado en el país, para su aplicación se requiere acondicionar el terreno con pequeños canales abiertos con una pendiente suave y uniforme para la distribución del agua, donde el agua recorrerá por la parte inferior del surco y en parte superior se ubicarán las plantas. Sin embargo, éste usa una gran cantidad de recurso hídrico por lo que se han creado nuevas tecnologías para aprovechar el agua de manera más eficiente y que permiten la implementación de fertilizantes, insecticidas, entre otros.

    - Por fajas: se subdivide al terreno en franjas rectangulares separadas longitudinalmente mediante caballones, el agua ingresa al terreno por la parte superior desde acequias y se va infiltrando a medida que avanza. Las dimensiones de las franjas dependerán del tipo de suelo y la inclinación del terreno.

2. Riego por aspersión: este sistema se caracteriza por aplicar el agua en forma de lluvia mediante aspersores que dependen de la capacidad de infiltración del suelo, la presión de trabajo y del área que se requiere regar. Estos pueden ser fijos o rotativos, generalmente colocados en una disposición en cuadrícula. Los aspersores se colocan sobre tuberías por lo que permiten que la entrega de agua se realice desde la altura. Permiten la aplicación de fertilizantes y pesticidas.

3. Riego localizado: conocido como microriego, comprende al riego por goteo, por difusores, por tubos perforados superficiales y subsuperficiales, y la microaspersión.

   - Riego por goteo: consiste en una red de tuberías que llega hasta cada planta donde entrega el caudal necesario en forma de gotas. Permite la aplicación directa de agua filtrada y fertilizantes, además su distribución es uniforme y se puede ajustar al tipo de suelo y de cultivo. Existen diferentes tipos de aplicadores como goteros, tuberías perforadas, tuberías de exudación, dependiendo de las necesidades específicas de los cultivos.

   - Riego por microaspersión: este sistema aplica el agua en forma de lluvia con gotas finas, de forma localizada y a una baja altura, mediante microaspersores (rotativos) y microjets (fijos). Permiten la aplicación de fertilizantes y pesticidas.

   - Riego californiano: consiste en un sistema cuya conducción y distribución se realiza mediante tuberías de PVC, aluminio u otros materiales. Este tipo de sistemas pueden ser móviles y fijos, permiten controlar y regular los caudales mediante pequeñas compuertas, que entregan el caudal directamente hacia los surcos del terreno. Este sistema no permite la aplicación de fertilizantes y pesticidas.

2.1.2.3 Elección de sistemas de riego

Para la elección de un sistema de riego, como los mencionados anteriormente, es necesario analizar cada situación para determinar cuál es el tipo de riego que mejor se ajusta a las necesidades. Se debe considerar la distribución del sistema principal y líneas secundarias, dimensiones, materiales, funcionamiento, eficiencia de cada sistema, cantidad de caudal requerido, tiempo de aplicación de agua y necesidad de aplicación de fertilizantes, topografía del terreno, tipo de cultivos, tipo de suelo.

Algunos de los factores a considerar previo a la elección de un sistema de riego se muestran a continuación:

TABLA 3 Factores que favorecen la elección del método de riego

FACTORES	RIEGO DE SUPERFICIE	ASPERSIÓN	RIEGO LOCALIZADO
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro de agua	Irregular	Regular	Continuo
Disponibilidad de agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza de agua	No limitante	Sin sólidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad al déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de producción	Bajo	Medio	Alto
Costo de la mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Costo de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad de capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Fuente: Pereira y Trout, 1999.

Por ejemplo, para un riego de superficie la topografía debe ser plana y regular; para un riego por aspersión la topografía puede tener un relieve suave; para un riego localizado la topografía puede ser irregular. De acuerdo con esto, va a depender del sitio en el que se colocará el sistema de riego y las condiciones del mismo para poder escoger el tipo de riego más adecuado.

2.1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PAQUETE COMPUTACIONAL WATERGEMS

El software WaterGEMS fue originalmente desarrollado por la Empresa Haestad Methods, misma que fue adquirida por Bentley Systems en 2004 (Martínez, 2016), a través de sus diferentes herramientas, permite realizar diferentes tipos de cálculo, mismos que se sintetizan adelante:

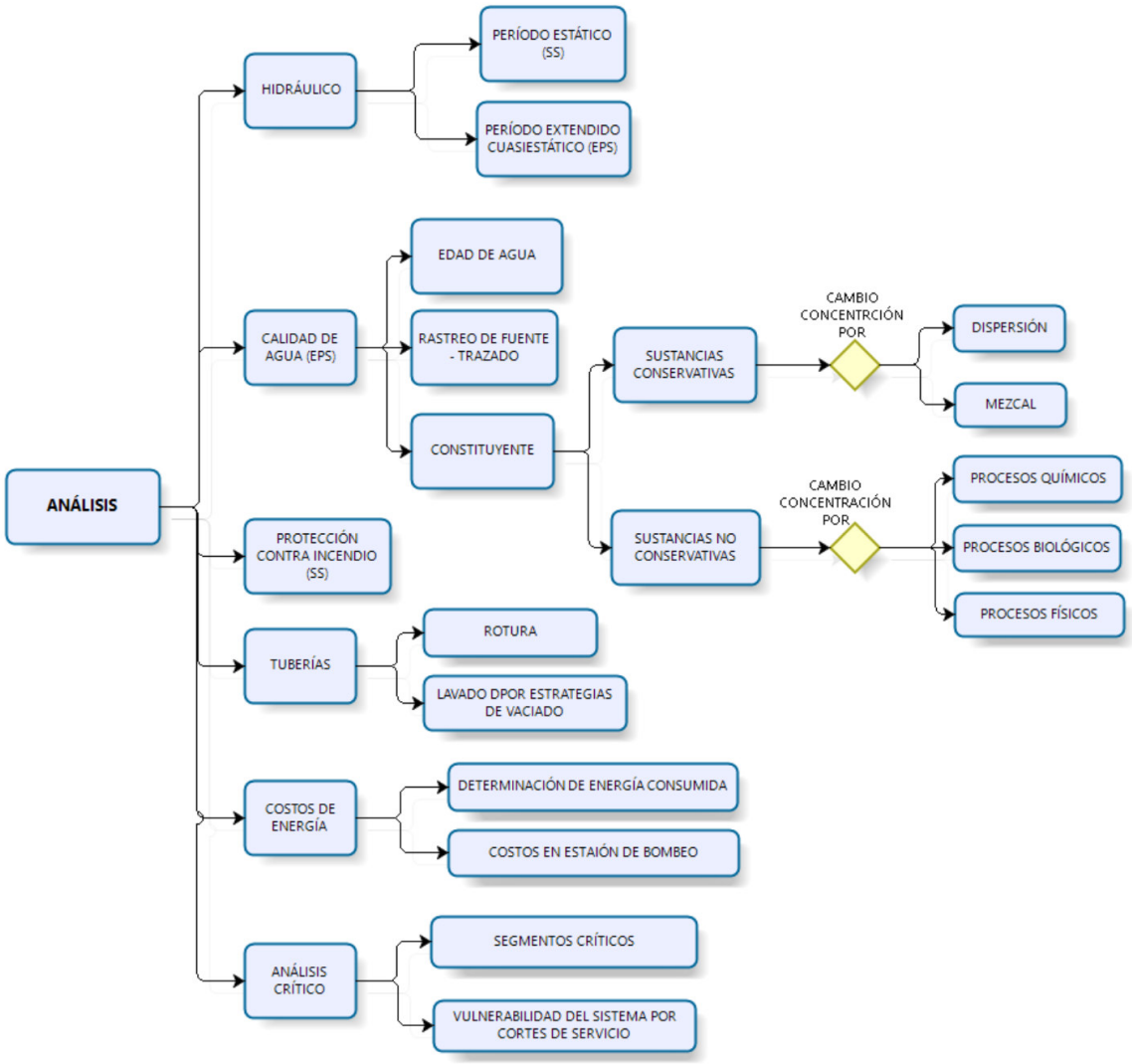


FIGURA 7 Esquema de los tipos de cálculo que realiza Watergems.
Fuente: Bentley, 2012
Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

El análisis hidráulico en periodo estático o Steady State, permite realizar un cálculo mediante ecuaciones de carga y de caudal determinadas a través de la ecuación

de Darcy Weisbach y de la ecuación de conservación de energía, su funcionamiento se muestra adelante:

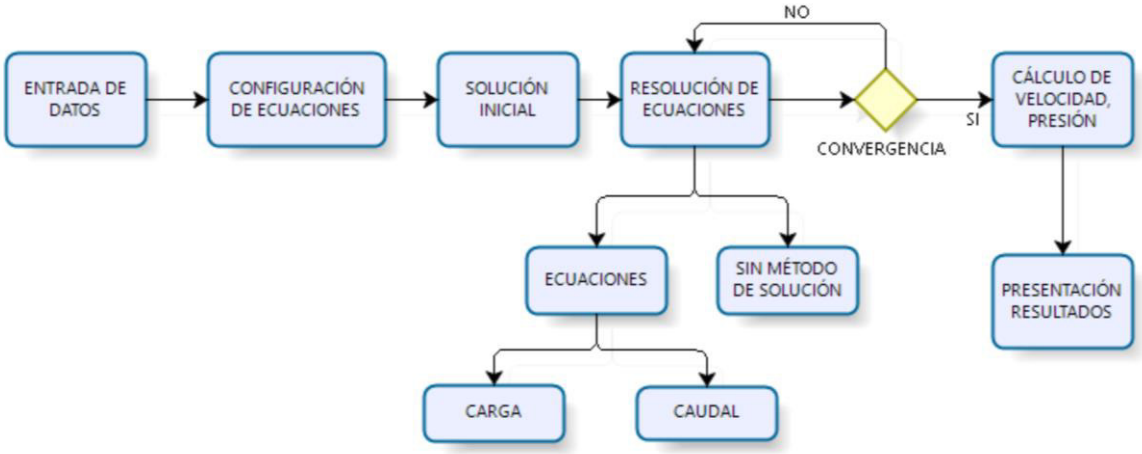


FIGURA 8 Esquema del funcionamiento del período estático (SS).
Fuente: Bentley, 2012
Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La ecuación de carga (EH), considerando las alturas piezométricas es:

$$\sum_{j=1}^{NT_i}\left[\frac{H_i-H_j}{\sum Km_{ij}+f\frac{l_{ij}}{D_{ij}}}\right]*\left(\left|H_i-H_j\right|\right)^{-1/2}*\sqrt{2g}*A_{ij}-Q_{Di}=0 \qquad (2.13)$$

$Donde$:
$\mathrm{H} = \text{altura piezométrica (m)}$
$\mathrm{NT} = \text{número de tubos del circuito}$
$A\ = \text{área de sección transversal } (m2)$
$Q = caudal\ (m3/s)$

La ecuación de caudal (EC), calculada desde la ecuación de conservación de la energía y el método de Darcy Weisbach es:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij}*\left(\left|Q_{ij}\right|\right)*\frac{\left[\sum Km_{ij}+f_{ij}\frac{l_{ij}}{D_{ij}}\right]}{2g*{A_{ij}}^2}=0 \qquad (2.14)$$

$Donde$:
$Q = caudal\ \left(\frac{m3}{s}\right)$
$NT = número\ de\ tubos\ del\ circuito$

$l = longitud\ (m)$
$D = diámetro\ (m)$

La fortaleza de este software está en su capacidad de trabajar con datos geoespaciales, permite realizar optimización, gestión de infraestructuras y control de riesgos. Adicionalmente, permite un análisis no solo hidráulico sino también permite realizar estimación de costos de inversión y consumo de energía. La optimización especialmente en el dimensionamiento de las tuberías se muestra a continuación:

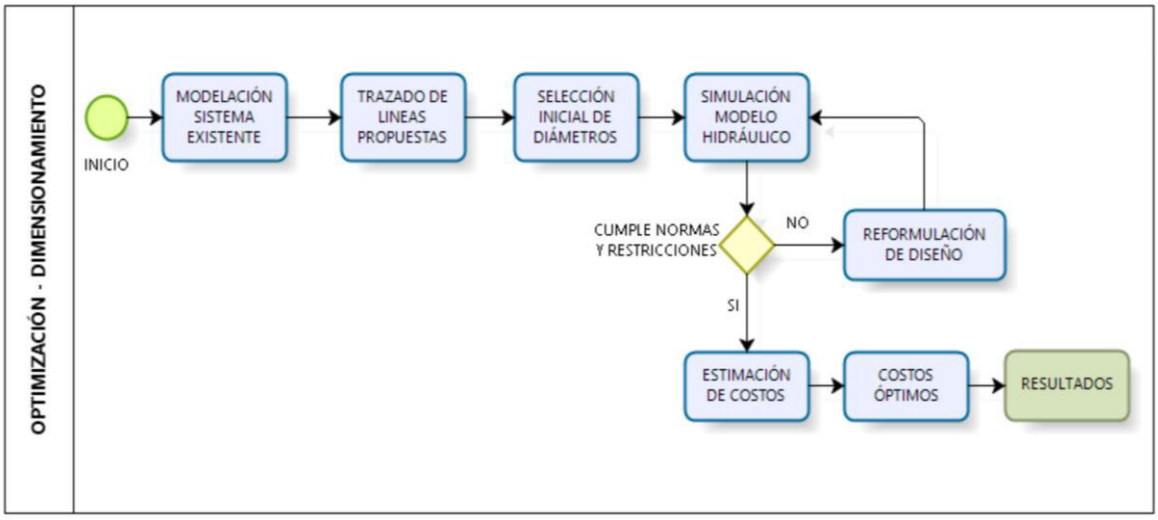


FIGURA 9 Esquema del funcionamiento de la optimización de Watergems.
Fuente: Bentley, 2012
Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La metodología que aplica el software WaterCAD/GEMS se denomina Gradiente Conjugado, misma que usa matrices acopladas y el uso de la factorización incompleta de Cholesky, lo que reduce el manejo de datos, memoria del equipo, y optimiza la cantidad de interacciones requeridas por el modelo (Martínez, 2016).

La siguiente figura muestra los datos de entrada que requiere el programa, los mismos que luego del procesamiento brindan como resultados las siguientes salidas:

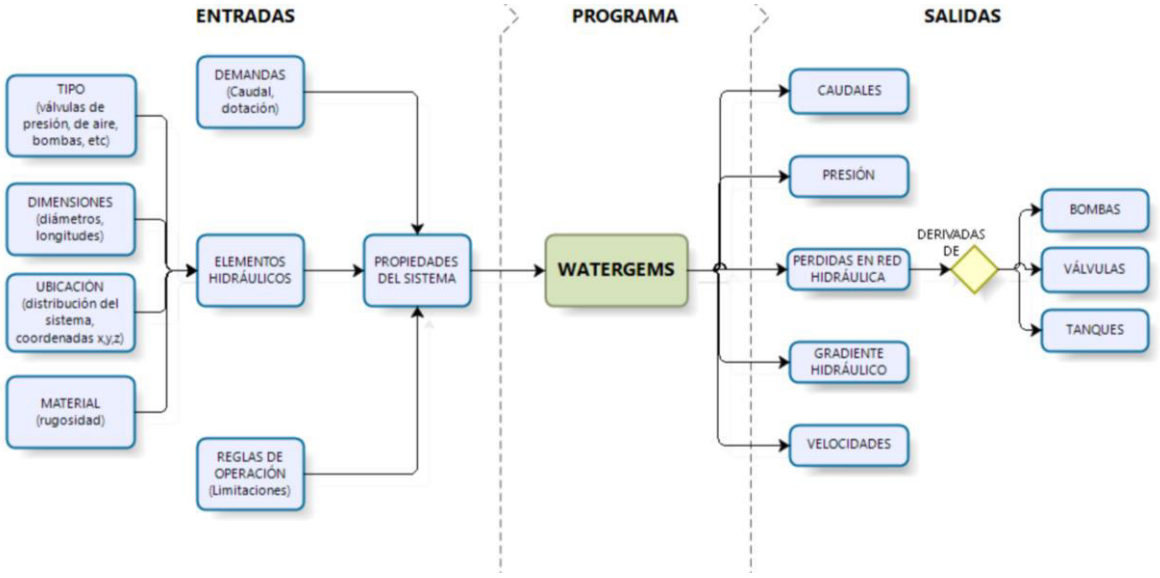


FIGURA 10 Esquema de entradas y salidas de Watergems.
Fuente: Bentley, 2012
Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Las herramientas del software permiten una interacción de la información con el Sistema de Información Geográfica – SIG (.mdb), AutoCAD (.dwg), Microstation (.dgn) y con plataformas STAND-ALONE (.dwh), y genera un archivo en extensión .wtg.mbd.

Los módulos más relevantes que dispone el programa son:

- Skelebrator: permite sintetizar, esquematizar las redes mediante procesos inteligentes de simplificación
- Darwin Designer: permite realizar una optimización del diseño de sistemas usando Algoritmos Genéticos y según criterios económicos y restricciones hidráulicas (Presión, Velocidad, Restricciones parciales). La optimización puede ser de tipo económica, hidraúlica y multiobjetivo.
- Darwin Calibrator: permite realizar una calibración hidráulica usando Algoritmos Genéticos que pueden gestionar múltiples situaciones específicas de demandas y condiciones de frontera mediante una correlación estadística con datos de campo. El análisis estadístico que maneja es mediante diferencia de cuadrados, valor absoluto, diferencia máxima, figuras de correlaciones.

- Darwin Scheduler: realiza una optimización de la energía con la finalidad de programar lo ciclos de bombeo basado en Algoritmos Genéticos
- Pipe Renewal Planner: permite realizar una planificación para la renovación de redes basada un análisis multi-criterio.
- SCADA Connect: Conexión en tiempo real del Modelo Hidráulico con Sistemas SCADA Adicional a los módulos

Las principales aplicaciones y usos de este software son:

- Evaluación de la capacidad del caudal para la extinción de incendios
- Creación de modelos hidráulicos mediante la importación de datos geoespaciales.
- Diseño de redes para distribución de agua
- Modelación de programas de lavado de tuberías para la remoción de biopelículas, mediante el control de la velocidad del caudal por la tubería.
- Identificación de pérdida de agua aplicando el control de la presión y del flujo.
- Gestión del consumo energético mediante la modelación de diferentes tipos de bombas analizando la energía que estas emplean.
- Permite priorizar la renovación de tuberías y simular redes en tiempo real.

2.1.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PAQUETE COMPUTACIONAL CROPWAT

CROPWAT es un software gratuito creado por la FAO (Food and Agriculture Organization) creado en 1992 para estimular el desarrollo de las actividades agrícolas. El objetivo principal es determinar el requerimiento de agua de un cultivo en especial, para este cálculo se requieren datos de la zona como tipo de suelo, condiciones climáticas y del cultivo. Además, permite realizar una programación de la dotación de agua que se debe suministrar al cultivo en los períodos desde la siembra hasta la cosecha (Estrada et al,1999).

Este software como base para los cálculos, utiliza el método de Penman-Monteith, de la FAO, para el cálculo de la evapotranspiración inicial de los cultivos (ETo),

cuyo dato servirá para estimar el requerimiento de agua para los cultivos y el calendario de riego (Guerra, 2009). La FAO posee una base de datos de las propiedades de diferentes tipos de cultivos, misma que se utiliza para el cálculo de la dotación y programación de agua para el cultivo, en zonas donde no se puedan obtener los datos reales o donde se requieran valores referenciales.

La siguiente figura muestra el procedimiento que sigue el programa para el cálculo de las necesidades de agua para los cultivos.

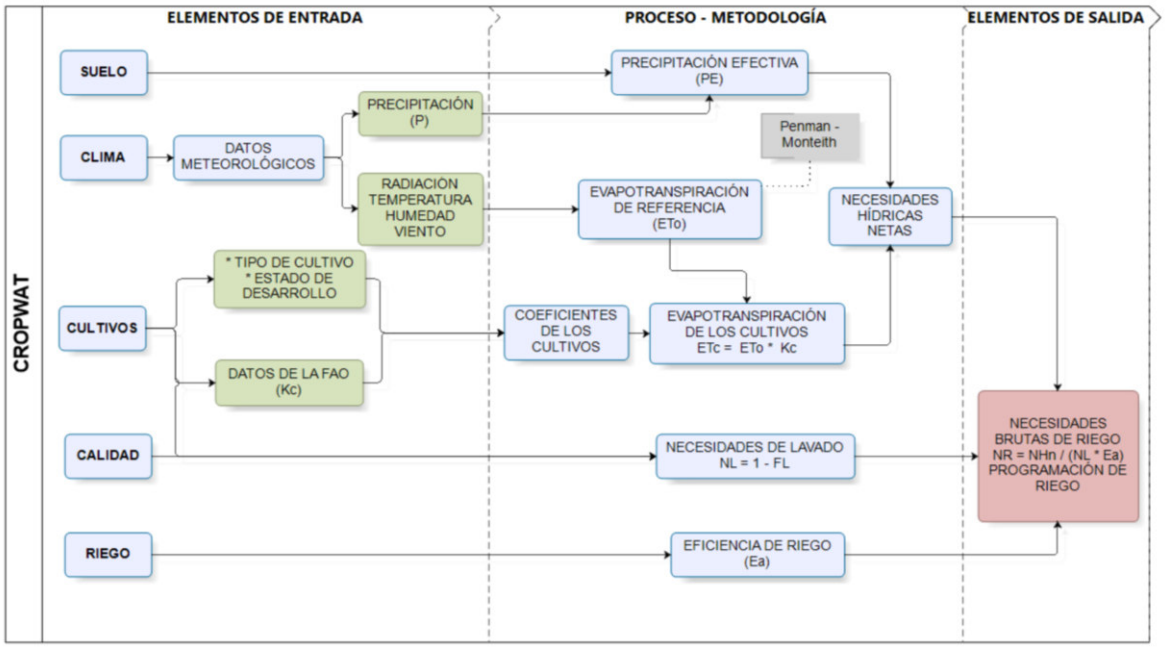


FIGURA 11 Esquema de entradas y salidas de Cropwat.

Fuente: Bentley, 2012

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Según Penman – Monteith, la evapotranspiración de referencia de calcula como muestra a continuación:

$$ET_o = \frac{0{,}408\,\Delta\,(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34\,u_2)} \qquad (2.15)$$

donde:

ET_o evapotranspiración de referencia (mm día^{-1})

R_n radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m^{-2}día^{-1})

R_a radiación extraterrestre (mm día^{-1})

G flujo del calor de suelo (MJ m^{-2} día^{-1})

T temperatura media del aire a 2 m de altura (ºC)

u_2 velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1})

e_s presión de vapor de saturación (kPa)

e_a presión real de vapor (kPa)

e_s - e_a déficit de presión de vapor (kPa)

Δ pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (kPa ºC^{-1})

γ constante psicrométrica (kPa ºC^{-1})

a) Radiación neta en la superficie del cultivo (R_n)

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \tag{2.16}$$

donde

R_n radiación neta [MJ m^{-2} día^{-1}]

R_{ns} radiación neta solar o de onda corta [MJ m^{-2} día^{-1}],

R_{nl} radiación neta de onda larga [MJ m^{-2} día^{-1}]

$$R_{ns} = (1 - \alpha)\, R_s \tag{2.17}$$

donde

R_{ns} radiación neta solar o de onda corta [MJ m^{-2} día^{-1}],

α albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0,23 para el cultivo hipotético de referencia [adimensional],

R_s radiación solar entrante [MJ m^{-2} día^{-1}],

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,k}^4 + T_{min,k}^4}{2}\right] \left(0{,}34 - 0{,}14\sqrt{e_a}\right) \left(1{,}35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0{,}35\right) \tag{2.18}$$

Donde

R_{nl} radiación neta de onda larga [MJ m^{-2} día^{-1}]

σ constante de Stefan – Boltzmann [4,903 x 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} día^{-1}],

$T_{max,K}$ temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas [K=ºC+273,16],

$T_{min,K}$ temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [K=ºC+273,16],

e_a presión de vapor real [kPa],

R_s/R_{so} radiación relativa de onda corta (valores ≤ 1,0)

R_s radiación solar media o calculada [MJ m^{-2} $día^{-1}$]

R_{so} radiación en un día despejado [MJ m^{-2} $día^{-1}$]

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a \tag{2.19}$$

donde

R_s radiación solar o de onda corta [MJ m^{-2} $día^{-1}$],

n duración real de la insolación [horas],

N duración máxima posible de la insolación [horas],

n/N duración relativa de la insolación [-],

R_a radiación extraterrestre [MJ m^{-2} $día^{-1}$],

a_s constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados (n=0),

$a_s + b_s$ fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados (n=N),

En caso de no disponer de datos reales de radiación solar se recomienda:
$a_s = 0{,}25$ y $b_s = 0{,}50$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_S \tag{2.20}$$

donde

ω_S $ángulo\ de\ radiación\ a\ la\ hora\ de\ la\ puesta\ del\ sol$

b) Radiación extraterrestre (R_a)

$$R_a = \frac{24*60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad (2.21)$$

Donde,

R_a radiación extraterrestre [MJ m^{-2} $día^{-1}$]

G_{sc} constante solar = 0,082 MJ m^{-2} min^{-1},

d_r distancia relativa inversa Tierra – Sol

ω_s ángulo de radiación a la puesta del sol [rad]

φ latitud [rad]

δ declinación solar [rad]

La distancia relativa inversa Tierra – Sol, d_n y la declinación solar, δ, están dadas por:

$$d_r = 1 + 0{,}033 * cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (2.22)$$

$$\delta = 0{,}409 * sen\left(\frac{2\pi}{365} - 1{,}39\right) \quad (2.23)$$

donde J es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol, ω_s, se da por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (2.24)$$

c) Flujo del calor de suelo (G)

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z \quad (2.25)$$

donde

G flujo de calor del suelo [MJ m^{-2} $día^{-1}$],

c_s capacidad calorífica del suelo [MJ m^{-3} $^oC^{-1}$],

T_i temperatura del aire en el tiempo i [ºC],

T_{i-1} temperatura del aire en el tiempo i-1 [ºC],

Δt intervalo de tiempo considerado [días],

Δz profundidad efectiva del suelo [m].

Para períodos mensuales:

La capacidad calorífica de suelo se asume como una constante 2,1 MJm^{-3} $^oC^{-1}$, teniendo G para períodos mensuales:

$$G_{mes,i} = 0{,}07(T_{mes,i+1} - T_{mes,i-1}) \quad (2.26)$$

En el caso de no disponer del valor de $T_{mes,i+1}$

$$G_{mes,i} = 0{,}14\ (T_{mes,i} - T_{mes,i-1}) \quad (2.27)$$

donde

$T_{mes,i}$ temperatura media del aire en el mes i [ºC],

$T_{mes,i-1}$ temperatura media del aire en el mes i-1 [ºC],

$T_{mes,i+1}$ temperatura media del aire en el mes i+1 [ºC],

d) Presión media de vapor de saturación (e_s)

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (2.28)$$

$$\mathrm{e^o(T)} = 0{,}6108 * \exp\left[\frac{17{,}27*\mathrm{T}}{\mathrm{T}+237{,}3}\right] \quad (2.29)$$

Donde

$e^o(T)$ presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T [kPa]

T temperatura del aire [ºC]

Si exp[..] 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [..]

e) Presión real de vapor (e_a)

La presión real de vapor derivada de datos psicrométricos es:

$$e_a = e^o(T_{húmedo}) - \gamma_{psi}(T_{seco} - T_{húmedo}) \quad (2.30)$$

donde

e_a	presión real de vapor [kPa]
$e^o(T_{húmedo})$	presión de saturación de vapor a la temperatura del bulbo húmedo [kPa]
γ_{psi}	constante psicrométrica [kPa $^oC^{-1}$]
T_{seco} - $T_{húmedo}$	depresión del bulbo húmedo, con T_{seco} la temperatura del termómetro de bulbo seco y $T_{húmedo}$ la temperatura del termómetro de bulbo húmedo [^{o}C].

La constante psicrométrica del instrumento es:

$$\gamma_{psi} = a_{psi} P \quad (2.31)$$

Donde,

a_{psi}	depende del tipo de ventilación del bulbo húmedo [$^oC^{-1}$], y
P	presión atmosférica [kPa].

En condiciones normales se utilizan los siguientes valores:

a_{psi} = 0,000662	para psicrómetros ventilados tipo de Asmann, con movimiento de aire de 5 m/s^{-1},
a_{psi} = 0,000800	para psicrómetros naturalmente ventilados (~1 m/s),
a_{psi} = 0,001200	para psicrómetros no ventilados instalados bajo techo.

La presión de vapor real utilizando la humedad relativa es:

$$e_a = \frac{e^o(T_{min})\frac{HR_{max}}{100} + e^o(T_{max})\frac{HR_{min}}{100}}{2} \quad (2.32)$$

donde

e_a presión real de vapor [kPa]

e^o (T_{min}) presión de saturación de vapor a temperatura mínima diaria [kPa]

e^o (T_{max}) presión de saturación de vapor a temperatura máxima diaria [kPa]

HR_{max} humedad relativa máxima [%]

HR_{min} humedad relativa mínima [%]

Para diferentes períodos, la HR_{min} y HR_{max} se obtienen de la relación entre la suma de los valores diarios y el número de días del período.

f) Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ)

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0{,}6108 * \exp\left(\frac{17{,}27 * T}{T + 237{,}3}\right)\right]}{(T + 237{,}3)^2} \quad (2.33)$$

donde

Δ pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura media del aire [kPa $^oC^{-1}$]

T temperatura media del aire [^oC]

si exp[..] 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [..]

g) Constante psicrométrica (γ)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0{,}665 * 10^{-3} * P \quad (2.34)$$

donde

γ constante psicrométrica [kPa $^oC^{-1}$]

P presión atmosférica [kPa]

λ calor latente de vaporización, 2,45 [MJ kg^{-1} $^oC^{-1}$]

c_p calor específico a presión constante, 1,013 x 10^{-3} [MJ kg^{-1} $^oC^{-1}$]

ε cociente del peso molecular de vapor de agua / aire seco = 0,622

Siendo P,

$$P = 101{,}3\left(\frac{293-0{,}0065\,z}{293}\right)^{5{,}26} \tag{2.35}$$

donde

P Presión atmosférica [kPa]

z Elevación sobre el nivel del mar [m]

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo ETc se determina de la siguiente manera:

$$ET_c = K_c\, ET_o \tag{2.36}$$

donde

ET_c evapotranspiración del cultivo [mm d^{-1}],

K_c coeficiente del cultivo [adimensional],

ET_o evapotranspiración del cultivo de referencia [mm d^{-1}].

Con la finalidad de calcular la precipitación efectiva se necesita realizar el cálculo de la escorrentía directa (E_d) la misma que se determina mediante la siguiente ecuación:

$$E_d = \frac{(P-P_o)^2}{P+4P_o} \tag{2.37}$$

donde,

E_d Escorrentía directa en mm.

P Precipitación total registrada en mm

P_o Abstracción inicial o umbral de escorrentía en mm.

Una vez obtenida la escorrentía directa (E_d) se calcula la precipitación efectiva (P_E) utilizando la ecuación siguiente:

$$P_E = P - E_d \tag{2.38}$$

Donde,

P_E Precipitación efectiva en mm

P Precipitación total registrada en mm

E_d Escorrentía directa en mm.

2.1.5 REVISIÓN DEL MARCO LEGAL Y CONCESIONES EXISTENTES

La presente investigación se sustenta en la siguiente normativa que se encuentra vigente:

2.1.5.1 Constitución de la República del Ecuador

Artículo 12: Establece que es agua es un recurso estratégico para el uso público, que no puede ser embargado y que además se considera patrimonio nacional.

2.1.5.2 Plan Nacional del Buen Vivir 2017-2021

Establece que es necesario impulsar el desarrollen las zonas rurales mediante el incremento de las áreas regadas para lo cual se designa como responsables al Consejo Sectorial de Hábitat y Ambiente, Consejo Sectorial de Infraestructura y Recursos No Renovables, GAD Provincial.

2.1.5.3 La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento

Artículo 12: Se manifiestan quienes son los responsables de la protección, recuperación, conservación y administración de fuentes de agua, encabezado por el estado en conjunto con las organizaciones comunitarias.

Artículo 39: Indica que los productores son responsables por el riego dentro de su parcela. Los GAD provinciales son responsables de planificar y ejecutar el servicio público de riego y drenaje, estas facultades que incluyen en su ejercicio la rectoría local, planificación, regulación y control local se estipulan en la RESOLUCIÓN 10, 12, Sección II, Art. 10. En esta además se le asigna a los GADs Provinciales la gestión de la tecnificación a nivel parcelario.

La Autoridad Única del Agua y la Autoridad Ambiental Nacional expedirán la normativa para garantizar la calidad del agua para riego y vigilará su abastecimiento, además de l*a gestión de los sistemas multipropósito, le corresponde a la Autoridad Única del Agua según (Art. 1 resolución 0012.).*

Artículo 40.- indica que la gestión del riego se realizará considerando una adecuada distribución, una ampliación del área de cobertura regante, impulsar la tecnificación, promoviendo la conservación del suelo, para de esta manera garantiza la cantidad de agua, así como permitir un incremento en el área productiva. Esto en complemento con lo que *indica el Art. 282 de la Constitución.*

Artículo 41.- La infraestructura de los sistemas públicos tanto riego como de drenaje no podrán ser privatizados; la gestión de estos sistemas es responsabilidad del Gobierno Central, los GADs y los usuarios, incluyendo, su operación y mantenimiento, y el manejo sustentable de sus fuentes y sus zonas de recarga.

Artículo 47.- Establece las funciones y atribuciones de las juntas de riego que son organizaciones sin fines de lucro encargadas de la administración de los sistemas de riego en sus comunidades de acuerdo también con el Art. 318 de la Constitución.

La Autoridad Única del Agua regulará y/o participará en estas atribuciones.

Artículo 67.- Las autorizaciones para el aprovechamiento económico del agua para riego son transferibles únicamente en caso de transmisión del dominio de la tierra.

Artículo 74.- Se garantiza y se respeta las formas, usos y costumbres propias de todas las comunidades, para la distribución interna y de caudales autorizados sobre el agua.

Artículo 83.- Se establecen las políticas para el mejoramiento de la infraestructura, calidad y cobertura del agua para uso doméstico y para riego.

Artículo 86.- El riego que garantiza la soberanía alimentaria (abrevadero de animales, acuicultura y actividades de producción agropecuaria alimentaria doméstica) está en segundo lugar en orden de prioridades con respecto a los destinos del agua, ya que como lo indica el Art. 57 del Código de la Producción, el Estado vela por la soberanía alimentaria. El Artículo 5 de la Ley Orgánica Del Régimen De Soberanía Alimentaria (LORSA) indica que el uso de agua para riego debe asignarse de acuerdo a esta prioridad.

Artículo 87.- Menciona que la *Autoridad Única del Agua dará las autorizaciones para el uso de agua para riego por un período de hasta 10 años que podrían ser renovados por un período igual.*

Artículo 130.- Menciona que la *Autoridad Única del Agua tiene la potestad de reasignar caudales de forma que se garantice una repartición equitativa de agua, además se establece que las suspensiones de las autorizaciones de uso de agua serán temporales mientras de solvente la causa por la que se le suspendió.*

Artículo 141.- Establece la metodología para la fijar el valor a pagar por el uso de agua para riego, considerando el volumen utilizado, y las características del tipo de cultivo y suelo, además, se menciona que las comunidades que reciben un caudal menor a 5 l/s y que *no deberán cancelara esta tarifa.*

DISPOSICIONES GENERALES

PRIMERA.- Le corresponde a los GADs provinciales planificar, construir, operar y mantener los sistemas de riego y drenaje según las regulaciones de la Autoridad Única del Agua. Esta responsabilidad les fue transferida en el Artículo 1 de la RESOLUCIÓN 0008-CNC-2.011; consta además en los artículos 42 y 263 de la Constitución, y lo desarrolla con mayor detalle el Artículo 133 del Código Orgánico De Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD), donde dispone que deben elaborar y ejecutar planes de riego locales en combinación con la Autoridad Única del Agua. Además, menciona que podrán delegar la gestión de mantenimiento y operación de los sistemas de riego al gobierno parroquial rural o a las organizaciones comunitarias.

2.1.6 OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE SISTEMAS DE RIEGO EXISTENTES

De forma general se presenta una metodología en función del análisis de varios estudios relacionados con la optimización hidráulica de sistemas de riego existentes, misma que se detalla a continuación:

- Levantamiento de información de campo: se realiza una o varias salidas de campo para tomar datos de dimensiones, materiales y disposición de las estructuras hidráulicas existentes desde la captación, conducción, almacenamiento, y distribución hasta los usuarios del sistema. Adicionalmente, se pueden requerir datos de la distribución de las parcelas, datos socioeconómicos, número de usuarios, características de los suelos, tipo de cultivos, horarios de riego, entre otras.
- Modelo hidráulico del sistema existente: se utiliza un programa computacional o una hoja de cálculo con la finalidad de representar el sistema existente para realizar un análisis de su funcionamiento, teniendo en cuenta los datos iniciales para los que fueron diseñados y utilizando a información levantada en campo. La calibración del modelo se plantea realizarla mediante la modelación con varias campañas de aforo, en

diferentes períodos estacionales y verificación del funcionamiento de las estructuras.

- Análisis del modelo existente: Una vez determinadas las posibles fallas o anomalías que se presentan en las condiciones de flujo como velocidad, caudales, presiones entre otras; se analiza las opciones para mejorar el funcionamiento del sistema.
- Optimización del sistema: de acuerdo a las condiciones del sistema existente se plantea una metodología con la finalidad de lograr que el sistema de riego trabaje eficientemente. Como parte de este proceso, se determina la cantidad de agua que requieren los cultivos para optimizar las demandas del sistema de riego.

En nuestro medio se han aplicado varias alternativas, modelos o metodologías para poder realizar la optimización de un sistema de riego existente, a continuación, se van a analizar algunas de las más relevantes:

- Rediseño hidráulico de las estructuras: de acuerdo a las condiciones del sitio, esto es topografía, caudal disponible, distribución de las demandas, entre otras, se propone un cambio en las dimensiones, tipo y disposición de estructuras hidráulicas de forma que el sistema trabaje de forma más eficiente (Ramos y Salazar, 2013).
- Riego tecnificado: consiste en utilizar la tecnología para automatizar la red de distribución y los turnos de riego (Lapo y Pérez, 2013). Dentro de este tipo de metodología para la optimización, se puede aplicar al riego por aspersores, microaspersores, goteo.

2.2 ESTADO DEL ARTE

Teniendo como objetivo mejorar la administración y planificación de los recursos hídricos, se han desarrollado varios modelos de optimización en los últimos años (Liu et al., 2011), (Hajkowick y Collins, 2007). En este sentido y ya que las actividades relacionadas con la agricultura presentan un alto consumo de agua (MAAMA, 2013), la mayoría de los modelos de optimización le han dado una gran

atención a la asignación óptima de los recursos hídricos en sistemas agrícolas (Lu, 2012; Reca, 2001; Rejani, 2009).

2.2.1 REVISIÓN DE INVESTIGACIONES

En la TABLA 4, se presentan investigaciones relacionadas con la evaluación hidráulica e hidrológica y la optimización de sistemas de riego.

TABLA 4 Descripción de la información relevante revisada

AUTOR (ES)	AÑO	PAÍS	TÍTULO	REVISTA O INSTITUCIÓN	RESUMEN / CONCLUSIONES
Alex Zapata y Pierre Gasselin	2005	Ecuador, Quito	El riego en el Ecuador: problemática, debate y políticas	CESA Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas	Se realiza un análisis general de la problemática del riego en el Ecuador con un enfoque especial en la gestión del mismo. Además, se analiza las leyes aplicables en materia de riego y se analiza una valoración del riego considerando los instrumentos que existen para el efecto, así como los principios que deberían aplicarse para la asignación diferenciada y los roles de las instituciones
Villafuerte Mora Sandra	2010	Ecuador, Quito	Diseño de captación, conducción principal, reservorio y redes secundarias del proyecto de riego Cariacu - Romerillos	Pontificia Universidad Católica del Ecuador	Se realizó un estudio para evaluar el nivel definitivo del potencial hídrico para el abastecimiento de agua para riego. Se realizó el diseño hidráulico del Sistema, de la captación, conducción principal, reservorio y redes secundarias considerando el caudal concesionado por SENAGUA. Lo más relevante es que el cálculo de almacenamiento se hizo en función de la demanda hídrica dependiendo del tipo de cultivo.
Bentley systems. Inc Latin America	2012	Colombia	WaterCAD/GEMS V8i, Curso de Modelación y Diseño de Sistemas de Distribución, Intermedio (sistema métrico)	Bentley Institute	Se realiza una presentación de las características, funciones y aplicaciones del software watergems.

AUTOR (ES)	AÑO	PAÍS	TÍTULO	REVISTA O INSTITUCIÓN	RESUMEN / CONCLUSIONES
Lapo Pauta Carmen Mireya y Pérez García Rafael	2013	Ecuador	Diseño óptimo de sistemas de riego a presión Aplicación en casos (Ecuador)	Revista de Investigación Agraria y Ambiental - Universidad Nacional Abierta y a Distancia Particular de Loja	La investigación propone un modelo híbrido que mezcla la programación lineal, la programación no lineal y los algoritmos genéticos (PYLAG - PNLAG) para el diseño de sistemas de riego a presión de forma que su costo sea el menor posible y considerando la eficiencia en la prestación del servicio. Los casos en los que se implementaron los modelos híbridos se disminuyó el costo en un 50% respecto al diseño de la red en función únicamente de las demandas. Esta disminución se debe a que el modelo PYLAG usa una selección de diámetros discretos.
Pucha Cuji Elsa Elena	2013	Ecuador, Quito	Análisis de las formas de liderazgo de los gobiernos comunitarios de la organización - UODIC (Unión de organizaciones de desarrollo integral de cicalpa), de parroquia Cicalpa del pueblo Puruway	Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito	Se realiza un análisis de la forma en la que se encuentran organizadas las comunidades, en especial la forma de liderazgo y su interacción con los gobiernos locales. Se analizan los diferentes tipos de organizaciones y liderazgo que han existido a lo largo de la historia, donde finalmente se tiene una organización denominada UODIC misma que tiene personería jurídica y cumple con las normativas de los gobiernos local y nacional.
Ramos Viteri Jaime Adrián y Salazar Corrales Cristian Paul	2013	Ecuador, Quito	Análisis y optimización hidráulica del sistema de captación del canal de riego Alumís bajo en la provincia de Cotopaxi	Escuela Politécnica Nacional	Se realiza una modelación para la evaluación del sistema hidráulico para identificar problemas que afecten su desempeño y se presentan alternativas de optimización del sistema de captación. Se determinó que algunas de estas estructuras no cumplen con las recomendaciones de la literatura, por lo que no trabajan eficientemente y producen pérdidas del recurso agua. En función de este análisis se plantea una propuesta de modificaciones en algunas estructuras del sistema para mejorar su funcionamiento y que éstas cumplan con las recomendaciones de la normativa y base teórica.
Tapia Cadena Daniel Fernando	2014	Ecuador, Quito	Manual de diseño de sistemas de riego tecnificado	Universidad Central del Ecuador	Se realiza una descripción de los componentes de diferentes tipos de sistemas de riego, generando un manual para el diseño de riego tecnificado de forma que éste pueda ser utilizado por personas con pocos conocimientos del tema y que sea una guía paso a paso para el riego por aspersión y goteo.

AUTOR (ES)	AÑO	PAÍS	TÍTULO	REVISTA O INSTITUCIÓN	RESUMEN / CONCLUSIONES
Calderón Baños Sandra Patricia	2014	Ecuador, Quito	Evaluación del recurso hídrico en la eficiencia del desarrollo de los cultivos en cinco barrios de Tumbaco, Pichincha	Universidad Central del Ecuador	Se realiza un planteamiento de una distribución de agua en función del área que tiene cada usuario para ser cultivada. Se determina que existe un déficit de recurso hídrico en la época seca del 36% de la superficie regable total, sin embargo, realizando una distribución en función de los requerimientos hídricos, aplicando un calendario de riego se indica que existió un exceso de agua.
Oscar Caicedo Camposano, Carlos Balmaseda Espinosa, Jaime Proaño Saraguro	2015	Ecuador, Los Ríos	Programación del riego del banano (Musa paradisiaca) en finca San José 2, Los Ríos, Ecuador	Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias	Se realizó una comparación de tres esquemas de programación de riego: reposición del déficit de humedad en el suelo hasta la capacidad de campo, aplicación de una lámina fija en intervalos definidos por el usuario y no regar. Se logró generar una programación de riego que reponga la humedad del suelo hasta la capacidad de campo cuando ha llegado al agotamiento crítico, siendo ésta la opción más eficiente y que no causa una reducción en el rendimiento del cultivo.
Martínez García Leidy	2016	Cuba, Santa Clara	Propuesta de rehabilitación para la red de abasto de agua potable de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas	Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas	Se realiza un análisis de la situación actual del sistema de abastecimiento de agua y se realiza una propuesta de rediseño del sistema para mejorar su funcionamiento mediante el software Watergems. Se proponen escenarios de un mallado unitario y sectorizado como alternativas de la modelación. El escenario sectorizado brinda las mayores prestaciones técnico - económicas del sistema.
Mullo Naula Josúe Ignacio	2016	Ecuador, Quito	Diseño de un sistema de riego parcelario para la comunidad San Pedro, ubicada en la Parroquia La Matriz, Cantón Guamote	Universidad San Francisco de Quito	Se realiza el diseño de un sistema de riego parcelario con la finalidad de distribuir eficientemente el recurso hacia cada cultivo considerando las variables que lo pueden afectar. Se utiliza el software cropwat y watercad con la finalidad de realizar una programación del riego y realizar el diseño de la conducción de agua. Se evidenció que los períodos de desarrollo de los productos analizados de acuerdo al modelo difieren de los que maneja la comunidad actualmente.
Collado Edwin y Saez Yessica	2017	Estados Unidos, Florida	Sistema de Riego Inteligente para Optimizar el Consumo de Agua	15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering,	Se realizó una optimización del sistema de riego haciéndolo inteligente, esto es, tener en cuenta las necesidades reales de agua de los cultivos y características del ambiente

AUTOR (ES)	AÑO	PAÍS	TÍTULO	REVISTA O INSTITUCIÓN	RESUMEN / CONCLUSIONES
			en Cultivos en Panamá	Education, and Technology: "Global Partnerships for Development and Engineering Education	y se o comparó con un sistema de riego con un flujo fijo, esto basado en demandas diarias. Se evidenció que el consumo de agua para lis tipos de plantas analizados es menor lo que implica disminuir el desperdicio y una mejor utilización de los recursos.
Sandoval Mena Erika Lizbeth	2017	Ecuador, Quito	Estimación de la huella hídrica en los cultivos de Quinua (chenopodium quinoa) de los cantones Cayambe y Riobamba ubicados en los Andes Ecuatorianos	Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito	Se realiza una estimación de la huella hídrica que cubre las necesidades de agua de los cultivos de quinua. Se utiliza el software cropwat para determinar el requerimiento de agua del cultivo de quinua, además se siguió la metodología de la WFN y la FAO, se determinó la evapotranspiración y la huella hídrica verde, azul y gris por parcela para las dos áreas de estudio Pucará y Colta, donde se maneja riego por aspersión-estacionario-fijo-temporal y a secano, respectivamente.
Rueda Punina Víctor John	2017	Ecuador, Quito	Estimación de la huella hídrica en los cultivos de palma africana y maíz duro en la provincia de Los Ríos y caña de azúcar en la provincia del Guayas para la producción de Biocombustibles.	Escuela Politécnica Nacional	Se determinaron los requerimientos de agua de los cultivos mediante el uso de cropwat. Se determinó la huella hídrica de los procesos de cultivo de palma africana, maíz duro y caña de azúcar, mediante la metodología WFN, cuyo cultivo más eficiente en el uso de agua es el de caña de azúcar.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGÍA

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1 UBICACIÓN

El sistema de riego de Virgen de las Nieves perteneciente a la comunidad Compañía Obraje está ubicado en el cantón Colta, al noroeste de la provincia de Chimborazo – Ecuador. La FIGURA 12 muestra la cuenca del río Chibunga, que forma parte de la cuenca alta del río Chambo y es donde se encuentra el sistema de riego de Virgen de las Nieves.

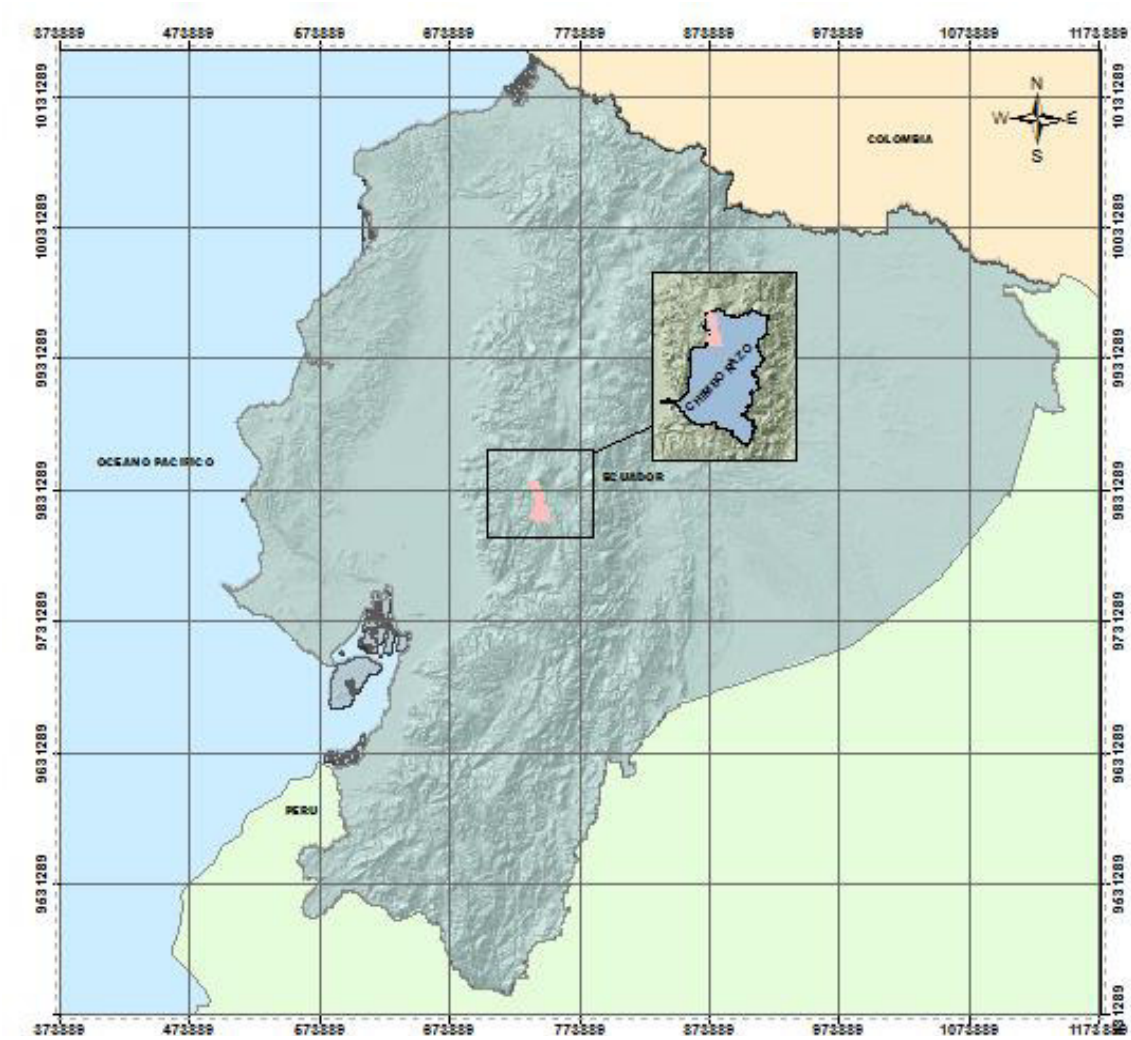


FIGURA 12 Ubicación de la Cuenca del rio Chibunga.
Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

TABLA 5 Coordenadas del proyecto de la Cuenca del Río Chibunga.

COORDENADAS	UTM 17 S - WGS84		Geográficas	
	X	Y	S	O
Norte	741.509	9.837.673	1°28´01.1028´´	78°49´45.9659´´
Sur	743.432	9.804.644	1°45´55.5804´´	78°48´42.6268´´
Este	752.153	9.813.978	1°40´51.5928´´	78°44´00.9233´´
Oeste	737.865	9.811.729	1°42´05.2848´´	78°51´42.9464´´
Punto de Cierre H0785	750.052	9.817.852	1°38´45.6432´´	78°45´09.0141´´

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La cuenca del rio Chibunga está ubicada en las coordenadas UTM 17S mostradas en la TABLA 5, y cuyo punto de cierre se encuentra en la estación hidrológica H0785 denominada Chibunga en Calpi.

3.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

La cuenca tiene una superficie de 308.55 km^2, perímetro de 131 km y tiene un rango de elevación entre los 3035 m s.n.m. a los 6242 m s.n.m. (TABLA 6).

TABLA 6 Características de la Cuenca del Río Chibunga.

Área de la cuenca	308.55	Km^2
Perímetro de la cuenca	131	Km
Longitud axial de la cuenca	33	Km
Longitud del río principal	23.5	Km
Cota Max	6242	m s.n.m.
Cota Min	3035	m s.n.m.
Altitud media	4638	m s.n.m.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Según Almeida, (2010), realizar un estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas permite aplicar sus resultados en la hidrología. La forma de la cuenca es uno de los parámetros que se requiere definir, ya que de ésta depende el tiempo de concentración en la cuenca, para lo que se utiliza el coeficiente de compacidad (kc).

$$K_c = 0.282 * P/\sqrt{A} \tag{2.39}$$

Donde:

$K_c = coeficiente\ de\ compacidad;$

$P = perímetro\ de\ la\ cuenca\ (km),$

$A = área\ de\ la\ cuenca\ (km2)$

Mientras que el factor de forma es la relación que existe entre el ancho medio, y la longitud axial de la cuenca,

$$K_f = A/L^2 \tag{2.40}$$

Donde:

$K_f = factor\ de\ forma;$

$A = area\ de\ la\ cuenca\ (km2)$

$L = longitud\ axial\ de\ de\ la\ cuenca\ (km)$

En base a la cartografía digital a escala 1:50.000 y otros mapas bases gratuitos del Sistema Nacional de Información (SNI), se realizó un mapa base de la cuenca del río Chibunga, delimitada en el software ArcGIS 10.1 en función de las líneas divisorias de agua y del punto de cierre en la estación H0785: Chibunga en Calpi. El Sistema de Riego Virgen de las Nieves, que forma parte de este estudio se encuentra dentro de la cuenca del rio Chibunga (FIGURA 13).

FIGURA 13 Cuenca del Rio Chibunga y Sistema de Riego de interés, Virgen de las Nieves.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria.

3.1.2.1 GEOMORFOLOGÍA

La cuenca del río Chibunga surge en la cordillera central de los Andes, por el norte sus afluentes se ubican dentro de la "Reserva de Producción de Fauna Chimborazo", la quebrada Yanausha se une al río Chimborazo, mientras que en el suroeste la quebrada Salada se une al río Sicalpa para formar parte del río Chibunga (FIGURA 13). Posteriormente el río Chibunga se une a la Quebrada

Punín para luego alimentar al río Chambo, el cual sigue su curso al norte para unirse con el río Patate y formar el río Pastaza.

Las elevaciones de esta cuenca varían desde los 3035 m.s.n.m., en el punto de cierre hasta los 6242 m.s.n.m. en el nevado Chimborazo. Esta cuenca pertenece a la región interandina (FIGURA 14).

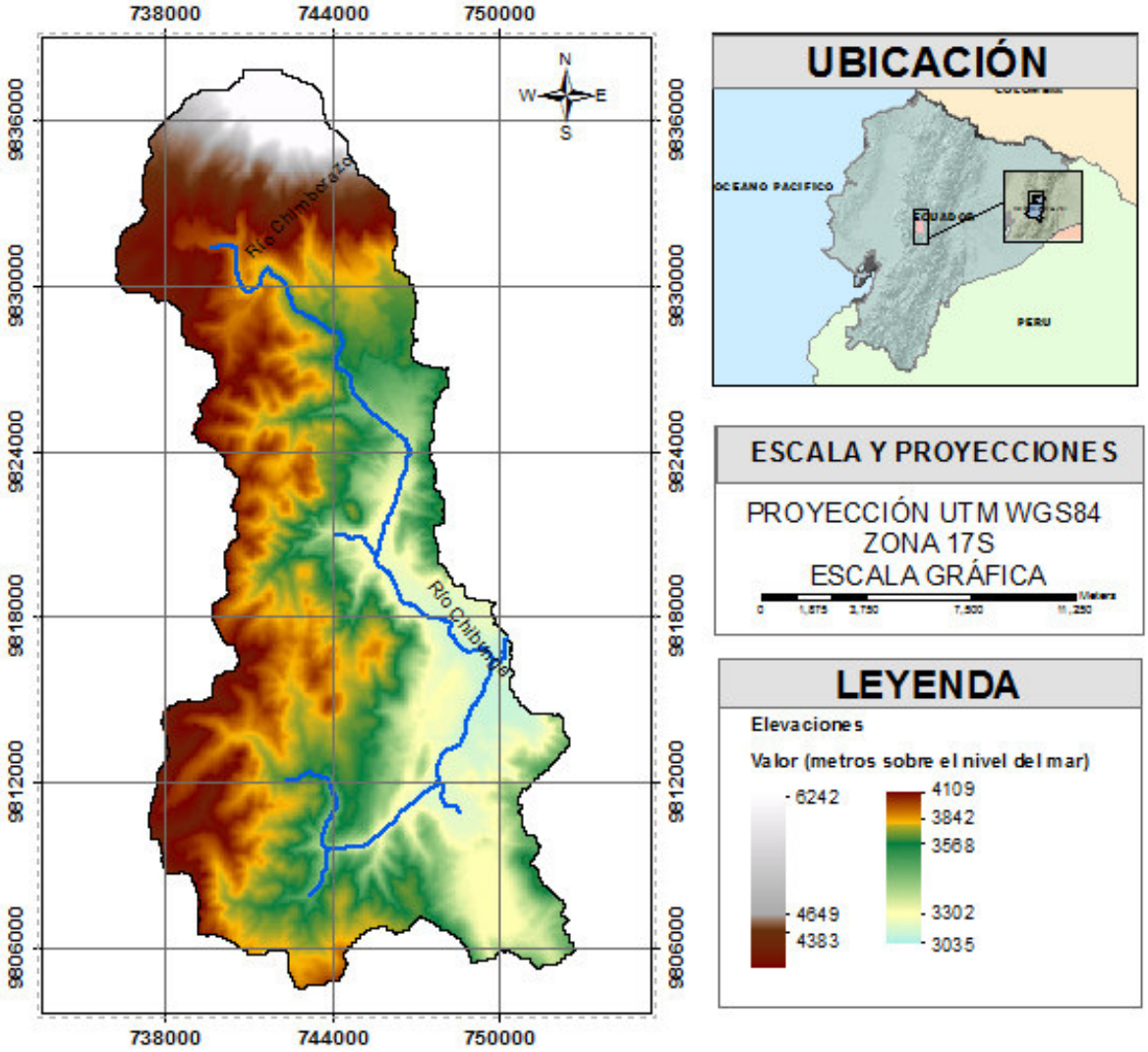


FIGURA 14 Mapa de elevaciones de la cuenca del rio Chibunga.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La textura y la cobertura del suelo de la cuenca son necesarios para interpretar la relación con los procesos hidrológicos en una cuenca. Estos parámetros inciden en la escorrentía superficial en forma directa, y a partir de estos definiremos el grupo hidrológico de suelo al que pertenece, según el Servicio de Conservación de suelos.

En la cuenca del Rio Chibunga, la textura media se presenta con el 49%, seguida por una textura fina con el 37%, con una textura media gruesa con el 9%, una textura gruesa con el 2% y un 3% que no aplica a ninguna clasificación de textura y forma parte de las faldas y del nevado Chimborazo (FIGURA 15).

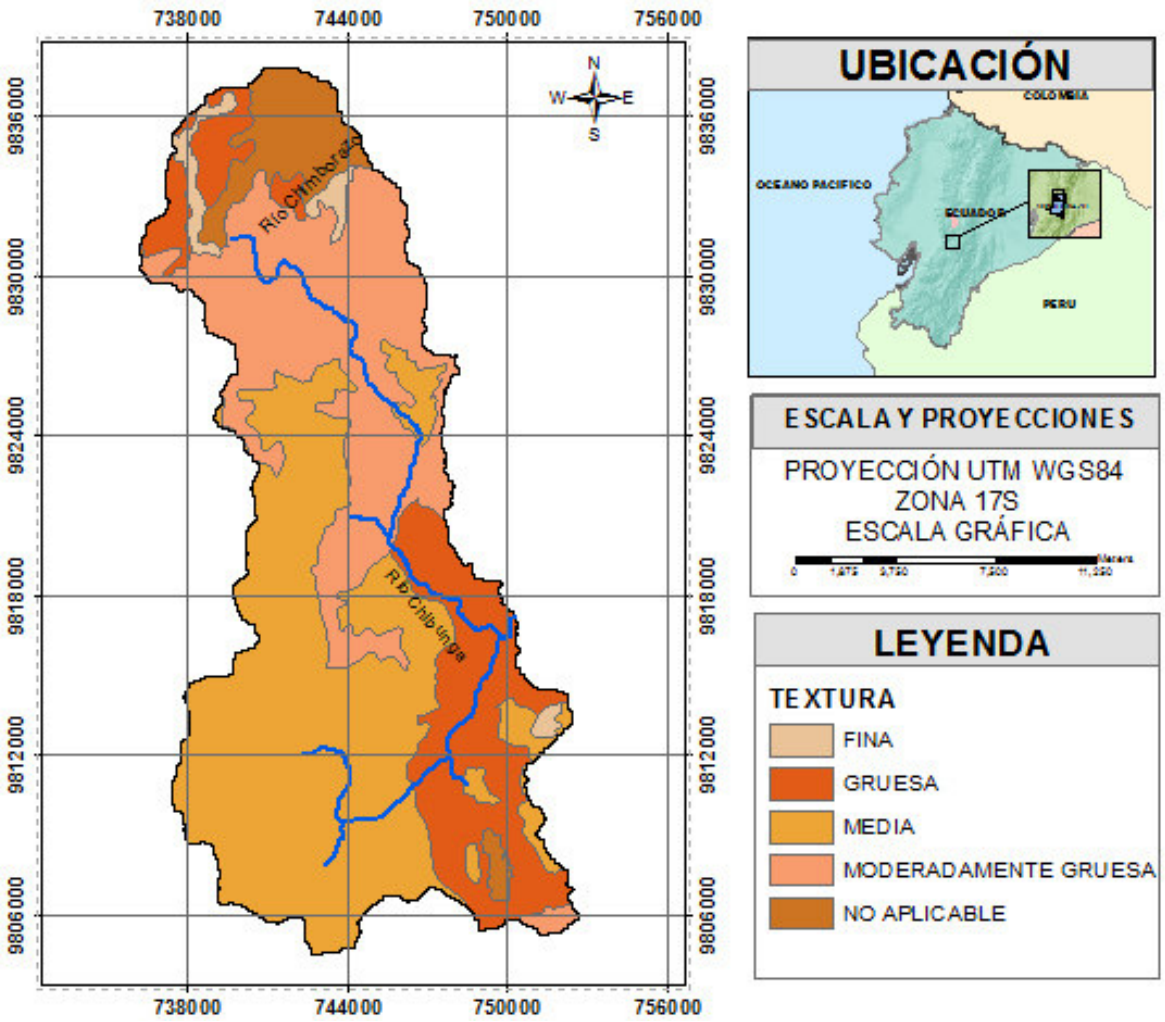


FIGURA 15 Textura de la cuenca del río Chibunga

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La cobertura del suelo en la Cuenca del rio Chibunga se presenta con vegetación arbustiva y herbácea en un 83%, cobertura erial con un 9% y agropecuarias con un 8% (FIGURA 16).

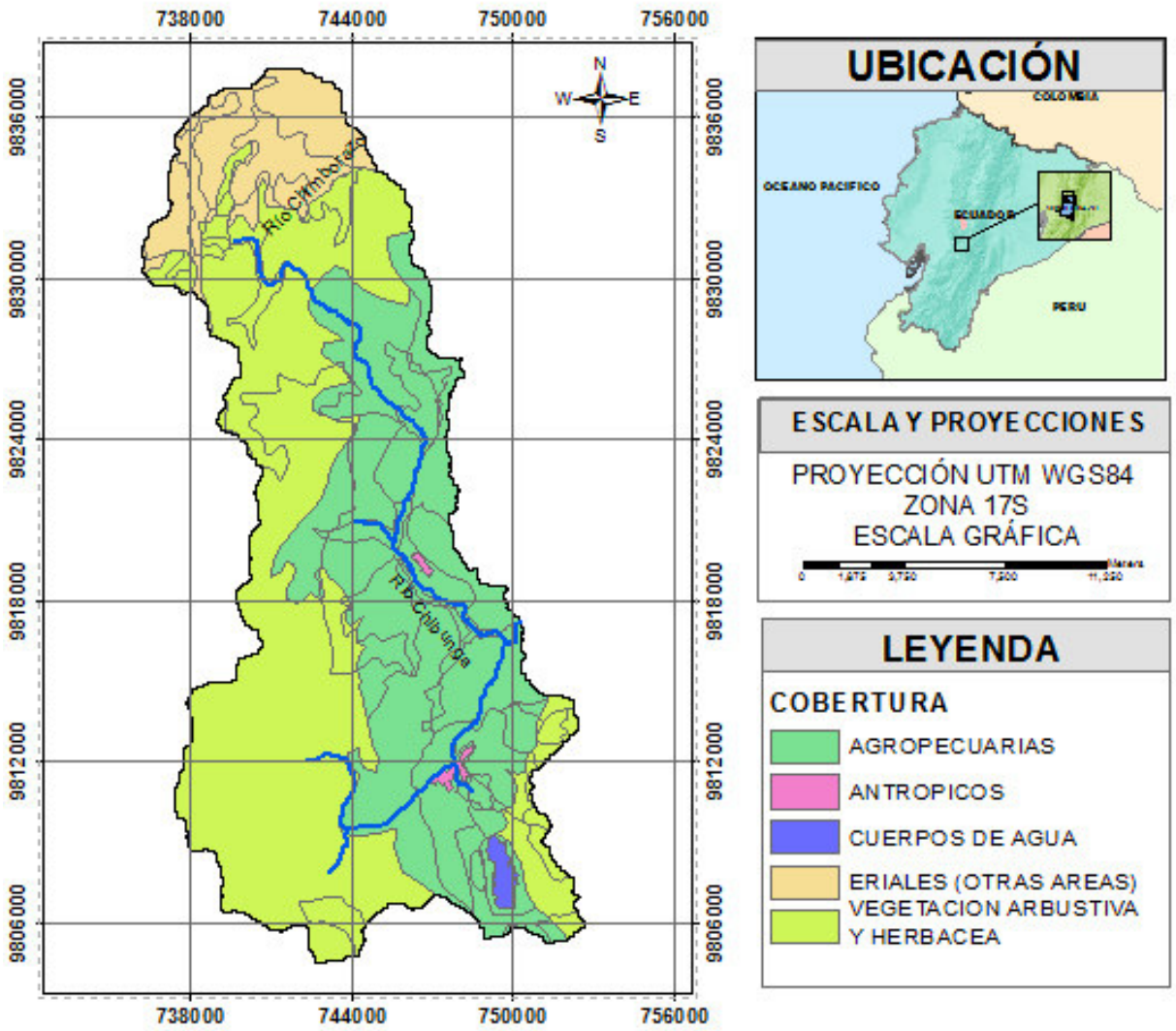


FIGURA 16 Cobertura de la cuenca del río Chibunga

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

3.1.2.2 CLIMA

La clasificación climática depende de múltiples variables, ligadas a sistemas regionales y micro regionales que tienen una gran diversidad, que depende de las características geográficas, mismas que varían significativamente en cortas distancias (Pourrut et al., 1995). Las investigaciones más relevantes que han adaptado una clasificación del clima a nuestra realidad se presentan a continuación. Sin embargo, vale la pena mencionar que existen grandes limitantes para esta

clasificación en Ecuador, debido a las irregularidades topográficas, y especialmente a la escasa información meteorológica disponible.

A continuación, se presentan dos tipos de clasificaciones climáticas que presentan diferentes datos de entrada, lo que permitirá comparar con dos metodologías, cual es la clasificación climática de la cuenca del río Chibunga, que mejor describe su comportamiento.

a) Clasificación climática de Naranjo.

La clasificación climática propuesta por Naranjo, en el estudio "El Clima del Ecuador" (Naranjo, 1981), está en función de la precipitación y la temperatura como factores determinantes, los cuales relaciona con la altitud y con la influencia de las corrientes marinas (TABLA 7):

TABLA 7 Clasificación del clima según la precipitación.

CLIMA TÉRMICO ALTITUDINAL	CLIMA PLUVIOMÉTRICO	
Clase	**Variedad**	**Tipo**
Según la media térmica anual	**Según la cantidad de lluvias (mm/año)**	**Según régimen anual de lluvias**
A. Tropical o tórrido 22 – 26 ºC 0 – 700 m.s.n.m. (costa)	1. Árido 250 mm	Anteandino u occidental, dos estaciones anuales, lluviosa de diciembre a abril
B. Subtropical 18 – 21,9 ºC 700 – 1800 m.s.n.m. (costa) 900 – 2000 m.s.n.m. (oriente)	2. Semiárido 250 – 500 mm	Interandino, tres estaciones anuales lluviosa abril y octubre –noviembre seca junio – agosto
C. Temperado 12 – 17,9 ºC 1800 – 3000 m.s.n.m	3. Semihúmedo 500 – 1000 mm	Oriental llueve todo el año (+ de 250 días). No hay estación seca.
D. Frío 0 – 11,9 ºC 3000 - 4500 m.s.n.m.	4. Húmedo 1000 – 2000 mm	Insular cuatro estaciones lluviosas entre febrero – abril y junio – septiembre.
E. Gélido 0 ºC +4500 m.s.n.m.	5. Muy húmedo 2000 - 3000 mm	
	6. Súper húmedo +3000 mm	

Fuente: Naranjo, 1981

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

b) Clasificación climática de Pourrut P.

La clasificación climática propuesta por Pourrut, en la investigación denominada "Los climas del Ecuador – Fundamentos Explicativos" de 1983, se representa en la FIGURA 17.

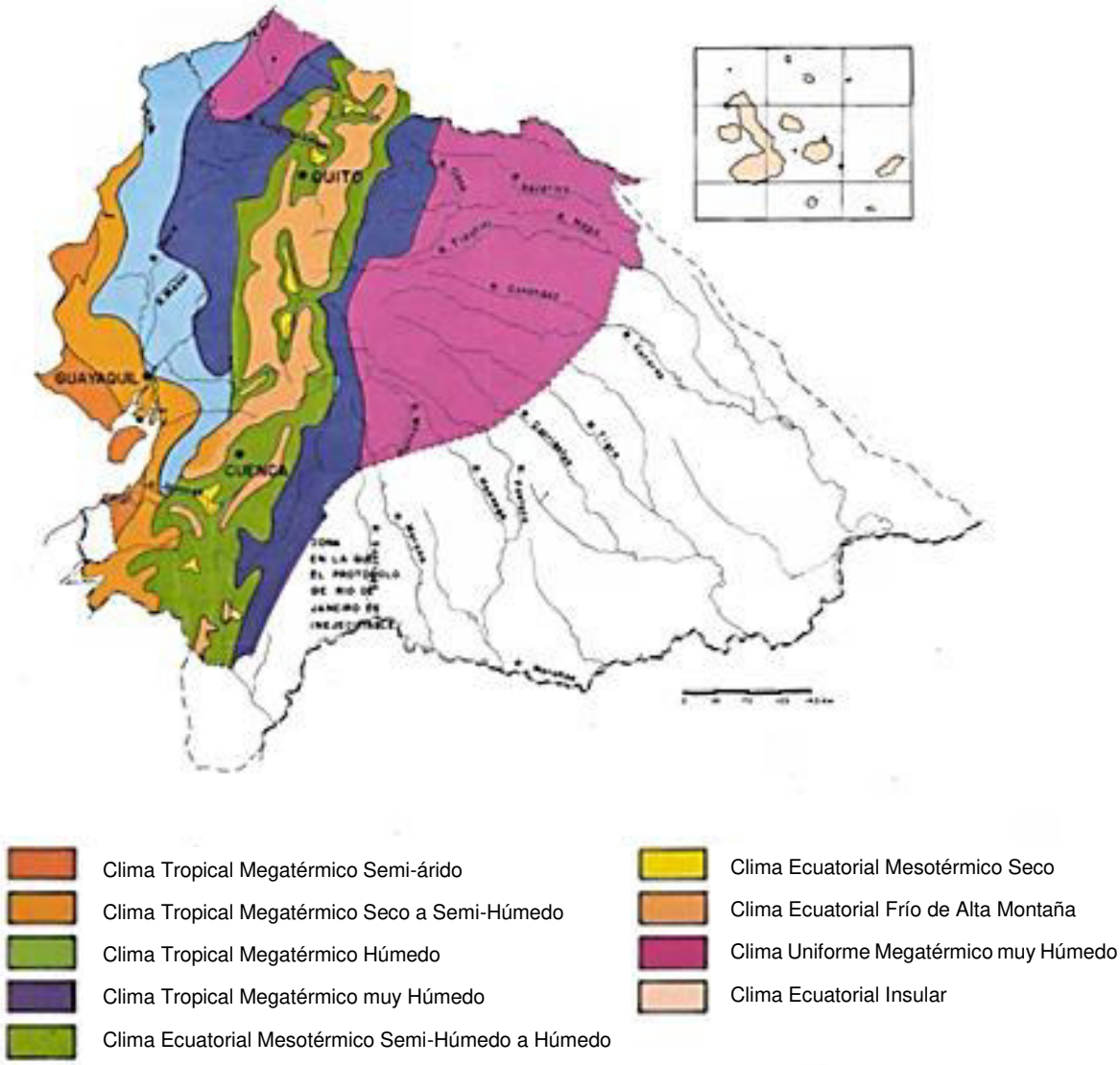


FIGURA 17 Distribución geográfica de los climas.

Fuente: Pourrut, 1983

La síntesis más utilizada para la caracterización del clima en Ecuador se presenta en el artículo "Clima del Ecuador", de Pourrut et al. (1995), donde en función de las variables anuales que se ajustan a la cuenca analizada, se escoge el tipo de clima que mejor la representa.

TABLA 8 Parámetros del clima para Ecuador.

TIPO DE CLIMA / VARIABLES ANUALES	Tropical megatérmico muy húmedo	Tropical megatérmico húmedo	Tropical megatérmico seco a semi-húmedo	Tropical megatérmico semi-árido	Uniforme megatérmico muy húmedo	Ecuatorial insular*	Ecuatorial frío de alta montaña	Ecuatorial mesotérmico semi-húmedo a húmedo	Ecuatorial mesotérmico seco
	PARÁMETROS								
Régimen de lluvias (número de estaciones)	1 húmeda 1 seca	1 húmeda 1 seca	1 húmeda 1 seca	1 húmeda 1 seca	1 húmeda	2 húmedas 2 secas	2 húmedas 2 secas	2 húmedas 2 secas	2 húmedas 2 secas
Meses secos **(número)	2 < N ≤ 6	6 < N ≤ 8	8 < N ≤ 11	12	N ≤ 2	4 < N ≤ 12	N ≤ 4	2 < N ≤ 8	8 < N ≤ 12
Temperatura media (°C)	T ≥ 22	T ≥ 22	T ≥ 22	T ≥ 22	T ≥ 22	T ≥ 22	T < 12	12 ≤ T ≤ 20	12 ≤ T ≤ 22
Duración de insolación (número de horas)	400 ≤ I ≤ 800	600 ≤ I ≤ 1000	800 ≤ I ≤ 1300	1000 ≤ I ≤ 1500	800 ≤ I ≤ 1500	1800 ≤ I	1000 ≤ I ≤ 2200	1000 ≤ I ≤ 2000	1800 ≤ I ≤ 2500
Altura de las lluvias (mm)	P > 2000	1000 < P ≤ 2000	500 < P ≤ 1000	P ≤ 500	P > 2000	200 < P ≤ 2000	800 ≤ P < 2000	600 < P ≤ 2000	P ≤ 600
Humedad relativa (%)	90 < h	70 < h < 90	60 < h < 85	50 < h < 70	90 < h	50 < h < 80	80 < h	65 < h < 85	50 < h < 80
Déficit hídrico ** (mm)	D ≤ 500	250 < D ≤ 700	700 < D ≤ 900	900 < D	D ≤ 100	500 ≤ D ≤ 1400	D ≤ 100	D ≤ 150	150 ≤ D ≤ 600

* Se presenta un clima muy heterogéneo
** Calculado mediante la fórmula de Thornthwaite

Fuente: Pourrut et al, 1995.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

3.1.2.3 RED DE DRENAJE

La pendiente de una cuenca afecta directamente a escorrentía superficial, su velocidad de formación y el tiempo que le toma a la lluvia para llegar hasta los lechos fluviales que componen la red de drenaje de las cuencas (Monsalve, 1995). Mediante el método de ordenamiento Horton-Strahler, se fija el orden igual a w=1 a los nacimientos de las corrientes, correspondientes al mayor nivel para la red, y a medida que se avance aguas abajo, se tiene que al unirse dos corrientes de igual orden (w) se forma una corriente orden w+1, y cuando se unen corrientes de diferente orden, se mantiene el orden del mayor de los dos (Mesa, 2018).

3.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE

3.2.1 VARIABLES METEOROLÓGICAS

Se utilizaron los datos disponibles del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMHI y de la cartografía del Instituto Geográfico Militar IGM. La Organización Mundial de Meteorología - OMM, recomienda que se utilice un período de los últimos 30 años de datos, considerando que el final del mismo sea el año más próximo que termine en cero. Es decir, si se tuvieran datos hasta 2002 se tomarían datos hasta el año 2000 (OMM, 2007). Verificando las estaciones próximas a la cuenca a analizar, se escogió un período de 30 años comprendido entre 1981 y 2010 para todas las variables climáticas.

Las estaciones analizadas son aquellas cercanas a la zona de estudio y de las cuales se dispone información. Los datos disponibles del INAMHI, de todas las variables climáticas se muestran en el Anexo 1. Las variables climáticas que se van a analizar son: precipitación (TABLA A1. 1 y TABLA A1. 2), temperatura (TABLA A1. 3 y TABLA A1. 4), evaporación (TABLA A1. 5 y TABLA A1. 6), humedad (TABLA A1. 7 y TABLA A1. 8), nubosidad (TABLA A1. 9), tensión de vapor (TABLA A1. 10), velocidad de viento (TABLA A1. 11) y heliofanía (TABLA A1. 12), cuyas características generales, así como el resumen del número de años de datos disponibles y porcentajes de vacíos mensuales (TABLA 9)

TABLA 9 Resumen de información de las estaciones meteorológicas analizadas.

VARIABLE CLIMÁTICA	CÓDIGO	NOMBRE	X	Y	ALTITUD	PROVINCIA	CANTÓN	DATOS DISPONIBLES			
								PERIODO	FRECUENCIA	AÑOS DISPONIBLES	OBSERVACIONES
Precipitación	M-393	SAN JUAN-CHIMBORAZO	746715	9819454	3220	CHIMBORAZO	RIOBAMBA	1964-2012	DIARIA MENSUAL	48	Presenta períodos mensuales sin datos
	M-394	CAJABAMBA	748633	9813276	3160	CHIMBORAZO	COLTA	1964-2001	DIARIA MENSUAL	36	Presenta períodos mensuales sin datos
Temperatura media diaria	M-258	QUEROCHACA	766205	9848380	2865	TUNGURAHUA	CEVALLOS	1985-2012	DIARIA MENSUAL	28	Presenta períodos mensuales sin datos
	M-133	GUASLAN	759976	9809268	2850	CHIMBORAZO	RIOBAMBA	1982-2011	DIARIA MENSUAL	29	Presenta períodos mensuales sin datos
Evaporación media mensual	M-258	QUEROCHACA	766205	9848380	2865	TUNGURAHUA	CEVALLOS	1985-2012	DIARIA MENSUAL	28	Presenta períodos mensuales sin datos
	M-128	PEDRO FERMIN CEVALLOS (COLEGIO)	765155	9850010	2910	TUNGURAHUA	CEVALLOS	1982-2011	DIARIA MENSUAL	29	Presenta períodos mensuales sin datos
Humedad media diaria	M-258	QUEROCHACA	766205	9848380	2865	TUNGURAHUA	CEVALLOS	1985-2012	DIARIA MENSUAL	28	Presenta períodos mensuales sin datos
	M-133	GUASLAN	759976	9809268	2850	CHIMBORAZO	RIOBAMBA	1982-2011	DIARIA MENSUAL	29	Presenta períodos mensuales sin datos
Nubosidad	M-258	QUEROCHACA	766205	9848380	2865	TUNGURAHUA	CEVALLOS	1985-2012	DIARIA MENSUAL	28	Presenta períodos mensuales sin datos
Tensión de vapor	M-258	QUEROCHACA	766205	9848380	2865	TUNGURAHUA	CEVALLOS	1985-2012	DIARIA MENSUAL	28	Presenta períodos mensuales sin datos
Velocidad del viento	M-258	QUEROCHACA	766205	9848380	2865	TUNGURAHUA	CEVALLOS	1995-2008	DIARIA MENSUAL	14	Presenta períodos mensuales sin datos
Heliofanía	M-258	QUEROCHACA	766205	9848380	2865	TUNGURAHUA	CEVALLOS	1990-2012	MENSUAL	23	Presenta períodos mensuales sin datos

ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE DATOS										
VARIABLE CLIMÁTICA	CÓDIGO	NOMBRE	DATOS DISPONIBLES			PERÍODO DE DATOS USADOS (1981-2010)				
			MESES SIN DATOS	MESES TOTALES PERÍODO	% VACÍOS MENSUALES	FRECUENCIA ANALIZADA	AÑOS DISPONIBLES UTILIZADOS	MESES SIN DATOS	MESES TOTALES PERÍODO	% VACÍOS MENSUALES
Precipitación	M-393	SAN JUAN-CHIMBORAZO	18	576	3.13	MENSUAL	30 años	16	360	**4.44**
	M-394	CAJABAMBA	51	432	11.81	MENSUAL	30 años	32	360	**8.89**
Temperatura media diaria	M-258	QUEROCHACA	18	336	5.36	MENSUAL	26 años	10	312	**3.21**
	M-133	GUASLAN	48	348	13.79	MENSUAL	28 años	47	336	**13.99**
Evaporación media mensual	M-258	QUEROCHACA	18	336	5.36	MENSUAL	26 años	10	312	**3.21**
	M-128	PEDRO FERMIN CEVALLOS (COLEGIO)	8	348	2.30	MENSUAL	28 años	8	336	**2.38**
Humedad media diaria	M-258	QUEROCHACA	18	336	5.36	MENSUAL	26 años	10	312	**3.21**
	M-133	GUASLAN	49	348	14.08	MENSUAL	28 años	48	336	**14.29**
Nubosidad	M-258	QUEROCHACA	18	336	5.36	MENSUAL	26 años	10	312	**3.21**
Tensión de vapor	M-258	QUEROCHACA	18	336	5.36	MENSUAL	26 años	10	312	**3.21**
Velocidad del viento	M-258	QUEROCHACA	26	168	15.48	MENSUAL	14 años	4	168	**2.38**
Heliofanía	M-258	QUEROCHACA	0	276	0.00	MENSUAL	21 años	0	252	**0.00**

Fuente: INAMHI

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La distribución de las estaciones y su ubicación respecto a la cuenca analizada se muestra en la FIGURA 18:

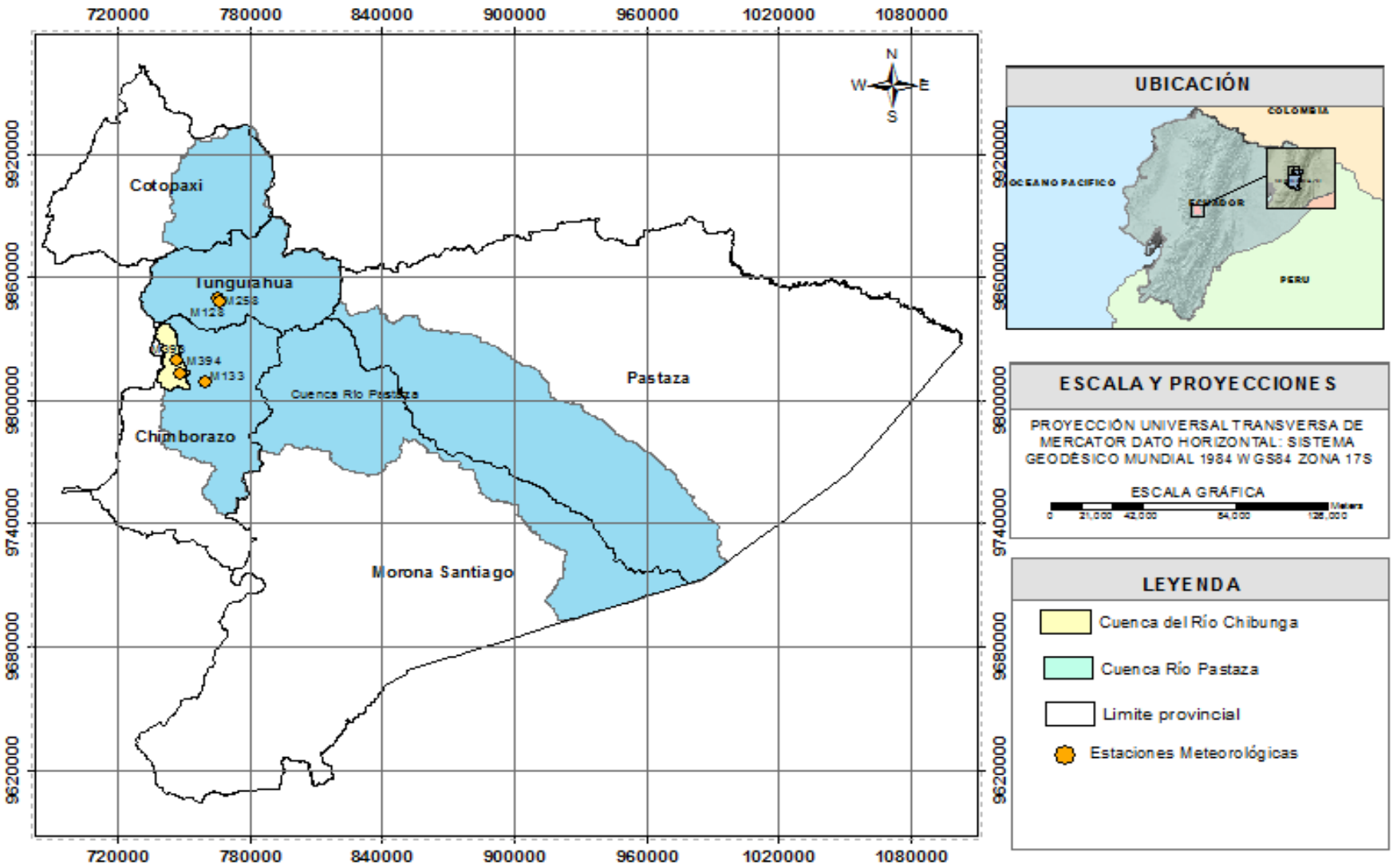


FIGURA 18 Estaciones meteorológicas de la cuenca del rio Chibunga

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

3.2.1.1 Relleno de datos faltantes de Información Meteorológica

La metodología aplicada para completar los vacíos de las variables meteorológicas es la correlación – regresión, que es el método estadístico más utilizado. Puede realizarse de forma gráfica o analítica, y es aplicado para las series de datos de estaciones cercanas entre sí o estaciones vecinas.

Este método utiliza un coeficiente de correlación r (coeficiente de Pearson), que permite evaluar el grado de asociación lineal entre dos grupos de variables, mide la dispersión de la nube de puntos respecto a una tendencia lineal o media de la serie. Está comprendido entre 1 y -1, cuando el valor es 0 implica que los datos no se encuentran correlacionados. Mientras que, cuando es 1, independientemente del signo, la relación es perfecta (Dagnino, 2014). Se tiene un criterio de aceptación donde una correlación es considerable, cuando su valor es mayor a 0.75 o menor a -0.75 (GEO, 2015) para un mismo período de tiempo. El cuadrado del coeficiente de correlación se denomina coeficiente de determinación r^2 y es la proporción de la varianza total de la variable de respuesta explicada por la regresión.

Cuando el coeficiente de correlación está dentro del rango aceptable, se obtiene la ecuación de la regresión lineal, $y = ax + b$ que relaciona las dos series de datos. La variable a completar es “y” mientras que “x” es la variable que tiene datos. En este caso de estudio, ya que no existen suficientes estaciones con datos, se utilizaron las estaciones que mostraban un mejor comportamiento y coeficiente de correlación, pese a que no cumplen con el coeficiente de determinación.

Adicionalmente, se realizó el relleno de datos faltantes con la media mensual para un período de datos faltantes menores a 5 años, para ciertos períodos de determinadas variables.

3.2.2 VARIABLES HIDROLÓGICAS

Para el análisis de la información hidrológica se utiliza la información que dispone el INAMHI en la zona y la información cartográfica disponible en el IGM. Considerando esta información se analizó los datos de las estaciones cercanas a la cuenca que se está analizando y que presentan condiciones similares, de las cuales se toman como relevantes las cuatro estaciones detalladas en la TABLA 10.

TABLA 10 Resumen de datos de Estaciones Hidrológicas cercanas a la cuenca de estudio

ESTACIÓN		UBICACIÓN					DATOS DISPONIBLES			
CÓDIGO	NOMBRE	X	Y	ALTITUD	PROVINCIA	CANTÓN	PERIODO	FRECUENCIA	AÑOS DISPONIBLES	OBSERVACIONES
H764	CALAMACA DJ Q.HUARCUSACHA	741900.94	9862136.50	3440	TUNGURAHUA	AMBATO	1988 - 2011	DIARIO MENSUAL	23	Presenta períodos mensuales sin datos
H781	VERDE AJ PASTAZA	800629.00	9844869.00	1495	TUNGURAHUA	BAÑOS DE AGUA SANTA	1962-1996	DIARIO MENSUAL	34	Presenta períodos mensuales sin datos
H785	CHIBUNGA EN CALPI	750052.35	9817852.37	3020	CHIMBORAZO	RIOBAMBA	1963-1985	DIARIO MENSUAL	17	Presenta períodos mensuales sin datos
H787	ALAO EN HDA.ALAO	776829.03	9792312.78	3200	CHIMBORAZO	RIOBAMBA	1963-2011	DIARIO MENSUAL	49	Presenta períodos mensuales sin datos

ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE DATOS									
ESTACIÓN		DATOS DISPONIBLES			PERÍODO DE DATOS USADOS (1981-2010)				
CÓDIGO	NOMBRE	MESES SIN DATOS	MESES TOTALES PERÍODO	% VACÍOS MENSUALES	FRECUENCIA ANALIZADA	AÑOS DISPONIBLES UTILIZADOS	MESES SIN DATOS	MESES TOTALES PERÍODO	% VACÍOS MENSUALES
H764	CALAMACA DJ Q.HUARCUSACHA	53	276	19.20	MENSUAL	22 años	132	276	**47.83**
H781	VERDE AJ PASTAZA	53	408	12.99	MENSUAL	15 años	30	192	**15.63**
H785	CHIBUNGA EN CALPI	37	204	18.14	MENSUAL	3 años	48	60	**80.00**
H787	ALAO EN HDA.ALAO	44	588	7.48	MENSUAL	10 años	40	120	**33.33**

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Dentro de la cuenca del río Chibunga se encuentra una estación hidrológica, que a su vez pertenece a la cuenca hidrográfica del Pastaza en donde se encuentran 3 estaciones hidrológicas adicionales (FIGURA 18). Los datos disponibles de estas estaciones se muestran en el Anexo 2.

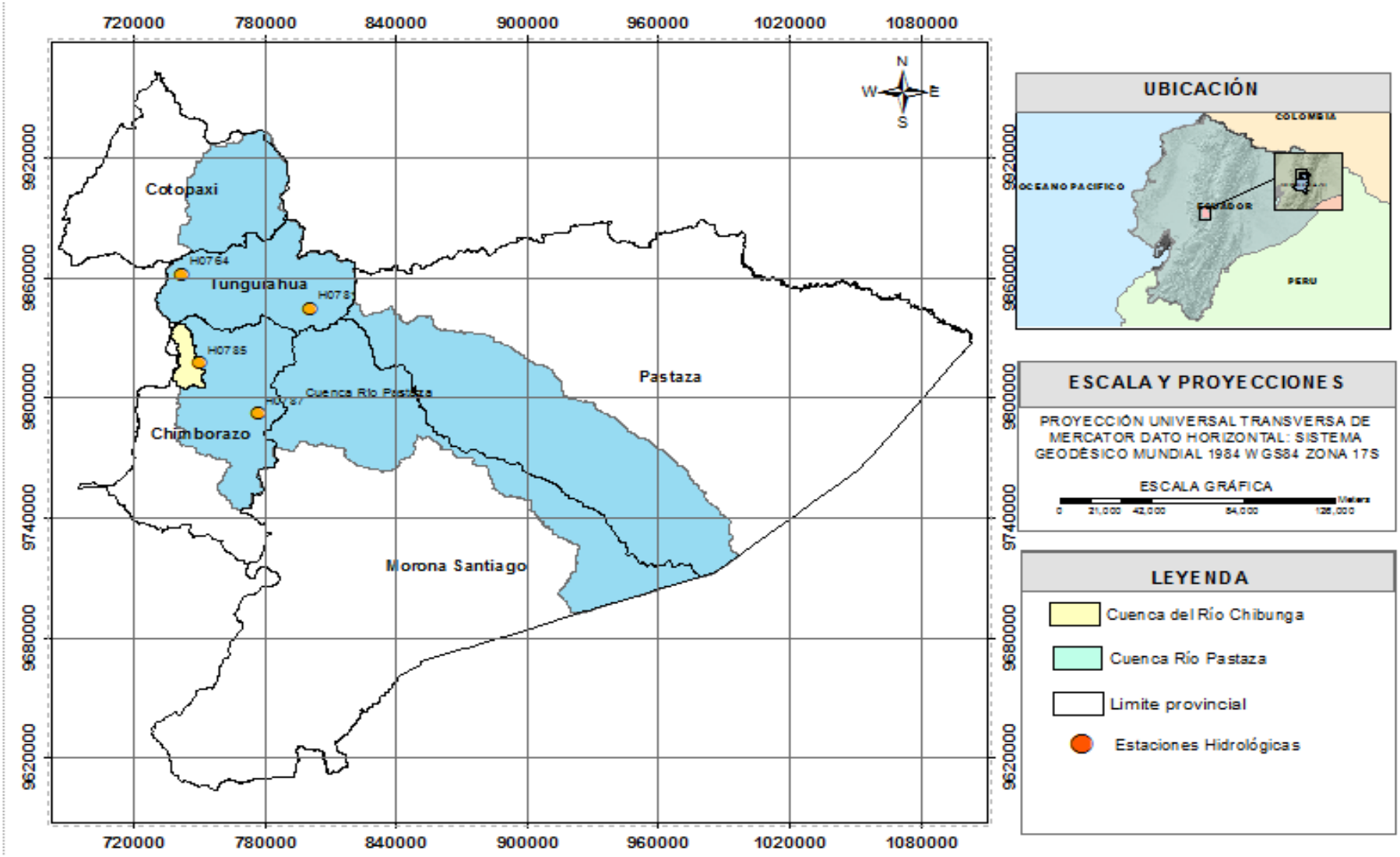


FIGURA 19 Ubicación de estaciones hidrológicas
Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

3.2.2.1 Relleno de datos faltantes de información hidrológica

Para el relleno de datos faltantes de la variable hidrológica se utilizó el método de correlación – regresión explicado en el numeral 3.2.1.1.

En el caso de la estación de cierre H785, se tienen características que dificultan el relleno de datos faltantes, debido a que no presenta una buena calidad de datos lo que incluye discontinuidades, presencia de datos anómalos, un período de datos disponible anterior a 1985 que evitaría cumplir con la recomendación de la OMM. Además, al aplicar el método de correlación - regresión con estaciones cercanas, su valor de correlación es inferior a 0,10. Pese a estas limitantes y con la finalidad de poder analizar las particularidades de la cuenca, se utilizaron los datos disponibles de esta estación (TABLA A2. 3).

Estos caudales se verificarán aplicando la siguiente metodología:

1. Obtener en caudal de la estación H785 del período de 1963 a 1982 de los datos del INAMHI.
2. Obtener los caudales de las 3 estaciones hidrológicas cercanas (H781, H764 y H787) de los datos del INAMHI del período comprendido entre 1981 y 2010.
3. Calcular el caudal estimado en las 3 estaciones hidrológicas (H781, H764 y H787) mediante el método SCS, usando las estaciones meteorológicas M393 y M394.
4. Realizar una comparación de los caudales estimados por el método SCS y los obtenidos de los datos del INAMHI.
5. Aplicar el método de trasposición de caudales, descrito en el numeral 3.3.1.1. usando las estaciones hidrológicas representativas (H-764 y H-787) para verificar el caudal de la estación de cierre H785. Esto considerando que las dos estaciones hidrológicas se encuentran cercanas a la zona de estudio, disponen de información de buena calidad y que presentan características como una cota similar a la cuenca del río Chibunga.
6. Para cumplir con el alcance de la presente investigación, se plantea aplicar el método de trasposición de caudales, con la finalidad de determinar los caudales

en cada una de las 7 captaciones que abastecen el Sistema de riego de la comunidad Virgen de las Nieves. Estos caudales se validarán con los aforos en las captaciones.

3.2.2.2 Curvas de Duración General

La curva de duración general (CDG) se realiza usando caudales diarios, mensuales o anuales, se la conoce también como curva de permanencia o persistencia de caudales. La ocurrencia de los caudales para rangos determinados permite el cálculo de las frecuencias absolutas y relativas (Villacís & Andrade,1985).

La CDG es una representación gráfica de los caudales observados en orden decreciente, los mismos que se colocan en el eje Y, estos caudales se encuentran asociados a una frecuencia o duración expresada en porcentaje que es la probabilidad del caudal a la que se espera que éste sea igualado o excedido y se grafica en el eje X. La duración se denomina como el intervalo de tiempo en el que el caudal observado es igual o mayor a un valor específico de caudal. La probabilidad de excedencia ($Q \geq Qi$), se determina con un vector de n elementos, esta probabilidad se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{(m)}=100\frac{m}{n} \tag{3.41}$$

Donde:
m = número de orden del dato, y;
n = número total de datos.

3.2.2.3 Curvas de Variación Estacional

La Curva de Variación Estacional (CVE) se construye con caudales medio mensuales, y representa la probabilidad de que estos puedan ser excedidos. Para su elaboración se calculó la probabilidad utilizando la metodología detallada en el

numeral 3.2.2.2 considerando que las series de datos utilizadas son los valores mensuales.

3.2.2.4 Estimación de caudales en captaciones

a) Método de Transposición de caudales

Se aplicó el método de transposición de caudales para trasladar la información de las cuencas que disponen de información a las cuencas que se requiere analizar. La siguiente ecuación relaciona el caudal con el área de las cuencas:

$$Qx = Qb\ \frac{Ax}{Ab} \tag{3.42}$$

Donde:

Qx = cuenca en análisis

Qb= cuenca base, que tiene información

Ax = área de la cuenca en análisis

Ab = área de la cuenca base

Considerando que el presente es un proyecto de riego se recomienda, trabajar con un caudal con una probabilidad de excedencia de al menos el 70%. Las captaciones se consideran como puntos de cierre de microcuencas para determinar el caudal, cuyas áreas de aportación se determinarán mediante el trazado de la línea de cumbres, usando una ortofotografía proporcionada por la ONG y las curvas de nivel del IG, cuyos puntos se validarán con el levantamiento de campo realizado.

b) Método del Servicio de Conservación de Suelos - Número de Curva

El método SCS- CN, Soil Conservation Service Curve Number ha sido desarrollado con la finalidad de determinar la escorrentía superficial en cuencas pequeñas. El comportamiento de la escorrentía en una cuenca hidrográfica se puede caracterizar mediante el número de curva (CN), el cual se determina a partir de algunas

características físicas del territorio como el tipo, la densidad, la cobertura y el grupo hidrológico de suelo (Díaz & Mercado, 2017).

El Servicio de Conservación de Suelos desarrollo el método para estimar la escorrentía directa generada por un evento de lluvia, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \tag{3.43}$$

$Donde$:

$Q = la\ escorrentía\ (mm)$

$P = lámina\ de\ lluvia\ (mm)$

$S = potencial\ máximo\ de\ retención\ (mm)$

El potencial de retención se relaciona con el número de curva (CN), a través de la siguiente expresión:

$$CN = \frac{25400}{S+254}\ (mm) \tag{3.44}$$

Las condiciones antecedentes de humedad influyen en la determinación del CN, de acuerdo con Singh (1992) se plantean tres condiciones de humedad considerando la lluvia total en los 5 días anteriores:

- Suelo seco: se denomina CN I, y se da cuando la precipitación es menor a 13 mm o menor a 35 mm, en plantas en período latente o de crecimiento, respectivamente.
- Suelo húmedo: se denomina CN III, producido cuando la precipitación es mayor a 32 mm o mayor a 52 mm, en plantas en período latente o de crecimiento, respectivamente.
- Suelo normal: se denomina CN II, y es el que muestran generalmente las tablas y su precipitación total se encuentra entre las dos condiciones de humedad anteriores.

Es de vital importancia determinar esta condición antecedente de humedad ya que, en un suelo seco, la absorción es mucho mayor que en un suelo húmedo, Para

ajustar estos valores a una condición húmeda CN III o seca CN I, se utilizan las siguientes expresiones (Chow et al., 1994):

$$CN\ (I) = \frac{4.2\ CN\ II}{10 - 0.058\ CN\ II}\ (mm) \tag{3.45}$$

$$CN\ (III) = \frac{23\ CN\ II}{10 + 0.13\ CN\ II}\ (mm) \tag{3.46}$$

Mediante la TABLA 11 se determina el grupo hidrológico del suelo, según su textura, descripción y permeabilidad.

TABLA 11 Clasificación de los grupos hidrológicos de suelo.

Grupo hidrológico de suelo	Textura	Descripción	Permeabilidad
A	Gruesa	Arenosos, Areno-limosos	Permeable
B	Moderadamente gruesa	Franco-arenosos, Francos, Franco-limosos	Permeable
C	Media	Franco-arcillosos, Franco-arcillo-limosos	Poco Permeable
D	Fina	Arcillosos, Suelos de reciente formación	Impermeables

Fuente: NRCS, 1986
Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Las características del suelo considerando los grupos hidrológicos, se muestran en la TABLA 12:

TABLA 12 Descripción de los grupos de suelo

Grupo hidrológico de suelos	Descripción de las características del suelo
A	Suelo con bajo potencial de escurrimiento, incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla; también suelo permeable con grava en el perfil. Infiltración básica 8-12 mm/h
B	Suelos con moderadamente bajo potencial de escurrimiento. Son suelos arenosos menos profundos y más agregados que el grupo A. Este grupo tiene una infiltración mayor que el promedio cuando húmedo. Ejemplos: suelos migajones, arenosos ligeros y migajones limosos. Infiltración básica 4-8 mm/h
C	Suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento. Comprende suelos someros y suelos con considerable contenido de arcilla, pero menos que el grupo D. Este grupo tiene una infiltración menor que la promedio después de saturación. Ejemplo: suelos migajones arcillosos. Infiltración básica 1-4 mm/h
D	Suelos con alto potencial de escurrimiento. Por ejemplo, suelos pesados, con alto contenido de arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados. Infiltración básica menor 1 mm/h

Fuente: NCRS, 2004

Con la finalidad de determinar el CN en el presente proyecto, se aplicó la siguiente metodología (Ferrer, Rodríguez, & Estrela, 1995):

1. Se rasterizaron los mapas de pendientes, grupo hidrológico, uso y cobertura vegetal del suelo. Al mapa de pendientes de clasifica en dos grupos: mayor al 3% y el otro menor al 3%.
2. Se asignaron números primos únicos a cada uno de los mapas que servirán para su clasificación.
3. Se multiplicaron los tres mapas, teniendo un número único para cada celda, resultado del producto de los números primos asignados.

4. Se ordenan estos valores de menor a mayor y se les asignan los valores de CN II, considerando las condiciones del sitio de estudio para lo cual se utilizan los valores de la TABLA 13 y TABLA 14.
5. Se agrupan los productos y se saca la media de los CN II asignados, para la reclasificación. Este CN II servirá para su ponderación considerando las áreas a las que corresponden.

TABLA 13 Números de curva CN II para áreas urbanas, suburbanas, rurales cultivadas y rurales

DESCRIPCIÓN DE LA COBERTURA		GRUPOS HIDROLÓGICOS DEL SUELO			
TIPO DE COBERTURA Y CONDICIÓN HIDROLÓGICA		A	B	C	D
ÁREAS COMPLETAMENTE DESARROLLADAS					
Espacios abiertos: parques, césped, campos de golf, cementerios, etc.					
Condición pobre (cobertura pasto <50%)		68	79	86	89
Condición media (cobertura pasto <50% a 75%)		49	69	79	84
Condición óptima (cobertura pasto>75%)		39	61	74	80
Áreas impermeables:					
Estacionamientos pavimentados, techos, accesos		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentos con cunetas y desagues pluviales		98	98	98	98
Pavimentos con zanjas a cielo abierto		83	89	92	93
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89
Distritos urbanos					
	Porcentaje promedio impermeable (*)				
Áreas comerciales	85	89	92	94	95
Áreas industriales	72	81	88	91	93
Distritos Residenciales:					
Áreas promedio de lote	Porcentaje promedio impermeable (*)				
500 m^2 o menos	65	77	85	90	92
1000 m^2	38	61	75	83	87
1350 m^2	30	57	72	81	86
2020 m^2	25	54	70	80	85
4040 m^2	20	51	68	79	84
8100 m^2	12	46	65	77	82
ÁREAS URBANAS EN DESARROLLO					
Áreas jerarquizadas (zona permeable)		77	86	91	94

DESCRIPCIÓN DE LA COBERTURA		GRUPOS HIDROLÓGICOS DEL SUELO			
TIPO DE COBERTURA	**CONDICIÓN HIDROLÓGICA**	**A**	**B**	**C**	**D**
PASTIZALES	Pobre	68	79	86	89
	Media	49	69	79	84
	Óptima	39	61	74	80
BAJOS CERCANOS A RÍOS		30	58	71	78
ZONAS DE MATORRALES CON PASTO	Pobre	48	67	77	83
	Media	35	56	70	77
	Óptima	30	48	65	73
ZONAS DE BOSQUES CON PASTO	Pobre	57	73	82	86
	Media	43	65	76	82
	Óptima	32	58	72	79
BOSQUES	Pobre	45	66	77	83
	Media	36	60	73	79
	Óptima	30	55	70	77

DESCRIPCIÓN DE LA COBERTURA			GRUPOS HIDROLÓGICOS DEL SUELO			
TIPO DE COBERTURA	**TRATAMIENTO**	**CONDICIÓN HIDROLÓGICA**	**A**	**B**	**C**	**D**
BARBECHO	Suelo desnudo	…	77	86	91	94
	Suelo con residuo de cosecha (RC)	Pobre	76	85	90	93
		Óptima	74	83	88	90
TIERRA SEMBRADA	Surcos Rectos (SR)	Pobre	72	81	88	91
		Óptima	67	78	85	89
	SR + RC	Pobre	71	80	87	90
		Óptima	64	75	82	85
	Nivelada (N)	Pobre	70	79	84	88
		Óptima	65	75	82	86
	N + RC	Pobre	69	78	83	87
		Óptima	64	74	81	85
	Nivelada y con terraceo (N&T)	Pobre	66	74	80	82

DESCRIPCIÓN DE LA COBERTURA			GRUPOS HIDROLÓGICOS DEL SUELO			
TIPO DE COBERTURA	TRATAMIENTO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	A	B	C	D
		Óptima	62	71	78	81
	N&T + RC	Pobre	65	73	79	81
		Óptima	61	70	77	80
PEQUEÑOS GRANOS	SR	Pobre	65	76	84	89
		Óptima	63	75	83	87
	SR + RC	Pobre	64	75	83	86
		Óptima	60	72	80	84
	N	Pobre	63	74	82	85
		Óptima	61	73	81	84
	N + RC	Pobre	62	73	81	84
		Óptima	60	72	80	83
	N&T	Pobre	61	72	79	82
		Óptima	59	70	78	81
	N&T + RC	Pobre	60	71	78	81
		Óptima	58	69	77	80

Fuente: NRCS, 2004.

TABLA 14 Número de curva con adaptaciones Témez, en condiciones medias de humedad.

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE	A	B	C	D
Barbecho R	>=3	77	68	89	93
Barbecho N	>=3	74	82	86	89
Barbecho R/N	< 3	71	78	82	86
Cultivos en hilera R	>=3	69	79	86	89
Cultivos en hilera N	>=3	67	76	82	86
Cultivos en hilera R/N	< 3	64	73	78	82
Cereales de invierno R	>=3	63	75	83	86
Cereales de invierno N	>=3	61	73	81	83
Cereales de invierno R/N	< 3	59	70	78	81

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE	A	B	C	D
Rotación de cultivos pobres R	>=3	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres N	>=3	64	75	82	86
Rotación de cultivos pobres R/N	< 3	63	73	79	83
Rotaciones de cultivos densos R	>=3	58	71	81	85
Rotaciones de cultivos densos N	>=3	54	69	78	82
Rotaciones de cultivos densos R/N	< 3	52	67	76	79
Pradera pobre	>=3	68	78	86	89
Pradera media	>=3	49	69	78	85
Pradera buena	>=3	42	60	74	79
Pradera muy buena	>=3	39	55	69	77
Pradera pobre	< 3	46	67	81	88
Pradera media	< 3	39	59	75	83
Pradera buena	< 3	29	48	69	78
Pradera muy buena	< 3	17	33	67	76
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	>=3	45	66	77	83
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	>=3	39	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	>=3	33	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	< 3	40	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	< 3	35	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	< 3	25	50	67	76
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy clara		56	75	86	91
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) clara		46	68	78	83
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) media		40	60	69	76
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) espesa		36	52	62	69
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy espesa		29	44	54	60
Rocas permeables	>=3	94	94	94	94
Rocas permeables	< 3	91	91	91	91
Rocas impermeables	>=3	96	96	96	96
Rocas impermeables	< 3	93	93	93	93

FUENTE: (Ferrer, Rodríguez, & Estrela, 1995)

Hay que ponderar para obtener el número de curva correspondiente a la cuenca en conjunto para el caso de cuencas o terrenos heterogéneos que posean variabilidad en uso de suelo, tipo de suelo o condiciones hidrológicas. El proceso consiste en determinar las áreas de cada polígono con características hidrológicas homogéneas y asignar el número hidrológico más apropiado y promediarlo con la superficie total de la cuenca (Mongil, 2012).

El CN ponderado se determina con la siguiente ecuación:

$$CN\ ponderado = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{A_i * CN_i}{At} \tag{3.47}$$

Donde:
$A_i = área\ de\ cada\ polígono$
$CN_i = CN\ de\ cada\ polígono$
$At = área\ total$
$n = número\ total\ de\ polígonos$

3.3 MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE RIEGO USANDO WATERGEMS

3.3.1 ANÁLISIS DE SITUACIÓN ACTUAL

Se realizó el levantamiento en campo mediante sistemas de posicionamiento global para determinar la ubicación geográfica del trazado de las redes de conducción y distribución. Además, se utilizaron instrumentos de medición de longitud y volumen para determinar las dimensiones de los elementos hidráulicos, así como los caudales.

Con los datos recopilados en campo se realizó la modelación hidráulica del sistema actual de riego de la comunidad de Virgen de las Nieves mediante el software Watergems y una hoja de cálculo.

3.3.1.1 MODELO CON CAUDALES TEÓRICOS

El primer modelo se realizará utilizando los datos de los caudales obtenidos en las microcuencas, en los puntos de las captaciones, mediante el método de trasposición de caudales.

3.3.1.2 MODELO CON CAUDALES AFORADOS

El segundo y tercer modelo se realizarán usando los datos obtenidos durante los trabajos realizados en campo, en la medición de los aforos en diferentes sitios significativos, tanto en la línea de conducción como en la línea de distribución. Los caudales máximos aforados se usarán para el segundo modelo, mientras que los caudales mínimos se utilizarán para una tercera modelación.

Para la sección de la distribución en todos los modelos, se considerarán dos condiciones la primera cuando se encuentren funcionando 5 aspersores simultáneamente y la segunda en el caso de que funcionen los 78 aspersores. La primera condición se consideró necesaria ya que actualmente, se dispone de uno hasta cinco aspersores por usuario del sistema de riego, dependiendo de su capacidad económica y el número de lotes que disponen. La segunda condición se planteó como un estado crítico, considerando que todos los aspersores funcionen simultáneamente.

3.4 MODELACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE AGUA DE LOS CULTIVOS MEDIANTE CROPWAT

3.4.1 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

Los datos que se utilizaran para la modelación con el software Cropwat, son los promedios multianuales de los períodos analizados en el numeral 3.2.1, y los promedios de las estaciones meteorológicas utilizadas de la base de datos del INAMHI (TABLA 15).

TABLA 15 Resumen de características climáticas para Cropwat

MES	CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS / ESTACIONES					
	Temperatura		Precipitación (mm/mes)	Humedad (%)	Velocidad de viento (m/s)	Heliofanía (horas)
	mínima (°C)	máxima (°C)				
	M258 - M133	**M258 - M133**	**M393 - M394**	**M258 - M133**	**M258**	**M258**
ENERO	13.15	15.19	56.03	76.15	0.7	5.1
FEBRERO	12.75	14.90	70.24	70.49	0.7	4.1
MARZO	12.90	15.05	80.83	77.06	0.6	4.0
ABRIL	13.20	15.15	95.83	76.48	0.7	4.2
MAYO	12.85	14.80	69.38	79.40	0.7	4.4
JUNIO	12.10	14.23	36.61	77.93	0.7	4.1
JULIO	11.25	13.82	25.46	78.69	0.8	4.5
AGOSTO	11.25	14.08	21.68	77.94	0.9	4.5
SEPTIEMBRE	12.00	13.95	37.80	75.90	0.8	4.6
OCTUBRE	13.10	14.85	75.36	76.36	0.7	5.2
NOVIEMBRE	13.20	15.10	81.11	72.22	0.7	5.2
DICIEMBRE	13.00	15.00	66.26	75.94	0.7	5.2

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Para los parámetros del cultivo y del suelo para el modelo, se han determinado valores basados en las tablas del Estudio FAO Riego y Drenaje: “Evapotranspiración del cultivo”, mismos que se muestran a continuación:

- Coeficiente de cultivo

Los cultivos que se van a analizar se determinaron mediante la tabulación de las encuestas en campo (Anexo 3), y se consideraron aquellos que en la actualidad usan riego en la comunidad. Los coeficientes de cultivo que se aplicarán se muestran en la TABLA 16, los mismos que han sido basados en las guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos realizadas por la FAO (2006). La variación del coeficiente de cultivo expresa los cambios de la vegetación y en el grado de cobertura del suelo durante el período de crecimiento, esta

variación está representada por la curva del coeficiente del cultivo, la cual puede ser descrita y construida por los valores correspondientes a la etapa inicial (Kc – inicial), la etapa de mediados de temporada (Kc – medio) y la etapa final (Kc – fin).

TABLA 16 Valores de Kc, coeficiente único del cultivo y alturas medias máximas de las plantas.

Cultivo	Kc – inicial	Kc – medio	Kc – fin	Altura Máx. cultivo (h) (m)
Zanahoria	0.70	1.05	0.95	0.30
Cebolla	0.70	1.00	1.00	0.30
Papa	0.50	1.15	0.75	0.60
Pasto de Pastoreo	0.30	0.75	0.75	0.10

Fuente: FAO, 2006

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

- Etapas de crecimiento

Las etapas de crecimiento se determinaron considerando la base de datos de la FAO, para los tipos de cultivos de la zona de estudio (TABLA 17).

TABLA 17 Días de crecimiento del cultivo con sus periodos de siembra

Cultivo	Inicial	Desarrollo	Medio	Final	Total	Fecha de Siembra
Zanahoria	30	40	60	20	150	Feb/Mar.
Cebolla	25	30	10	5	70	Abril/Mayo
Papa	25	30	45	30	130	Mayo
Pasto de Pastoreo	10	20	20	10	60	Enero

Fuente: FAO, 2006

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

- Profundidad radicular y Fracción de agotamiento crítico (p)

Los valores máximos y mínimos de la profundidad efectiva de las raíces y fracción de agotamiento de humedad en el suelo (p) para situaciones sin estrés hídrico para los cultivos seleccionados constan en la TABLA 18.

TABLA 18 Profundidad máxima efectiva de raíces - fracción de agotamiento de los cultivos

Cultivo	Profundidad radicular máxima	Fracción de agotamiento
Zanahoria	0.50 – 1.00	0.35
Cebolla	0.30 – 0.60	0.30
Papa	0.40 – 0.60	0.35
Pasto de Pastoreo	0.50 – 1.50	0.60

Fuente: FAO, 2006

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

- Factor de respuesta del rendimiento (Ky)

Los valores de Ky, se encuentran únicamente para 23 cultivos. El Estudio FAO Riego y Drenaje: “Evaporación del cultivo” indica que para cultivos de los cuales se desconozca el valor de Ky, se puede usar Ky=1 o seleccionar valores correspondientes a un cultivo de características similares. Por lo que, para la zanahoria se ha asumido un valor Ky=1.1, igual para la papa, considerando que se encuentran dentro del grupo de tubérculos. Para el pasto de pastoreo se consideró un valor Ky=1, que equivale a un valor promedio de los cultivos del grupo gramíneas y al recomendado por la FAO. En la TABLA 19 se presentan los coeficientes estacionales de respuesta de la productividad.

TABLA 19 Coeficiente estacional de respuesta de productividad

Cultivo	Ky
Cebolla	1.1
Papa	1.1

Fuente: FAO, 2006

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Las características de los suelos de las comunidades en estudio, han sido tomadas del mapa de textura de la FIGURA 15 y el mapa de litología de la FIGURA 20, y se presentan en la TABLA 20.

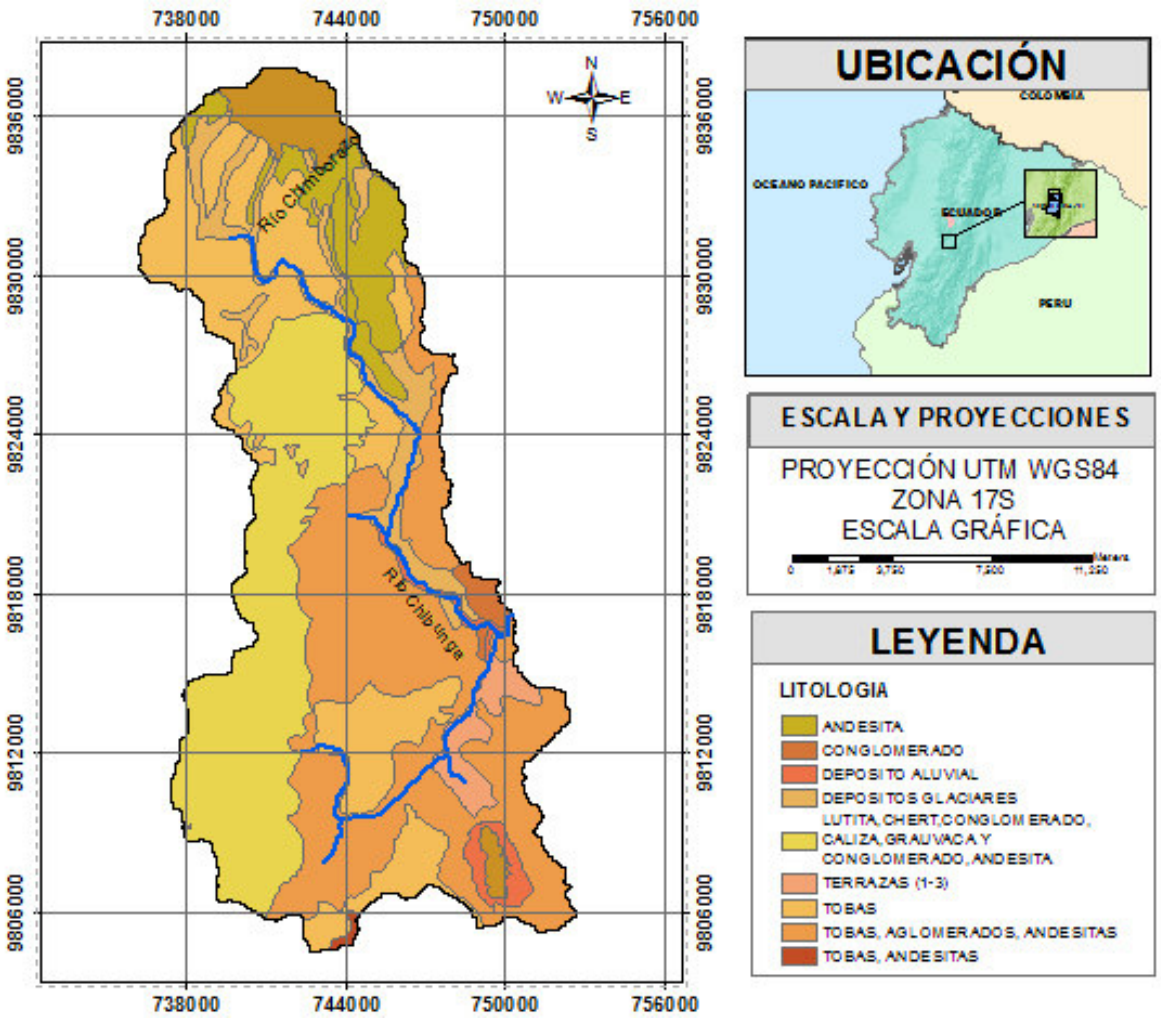


FIGURA 20 Mapa de litología de la cuenca del Chibunga.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

TABLA 20 Litología y tipo de suelos de la Comunidad Virgen de las Nieves

Litología	Cobertura	Textura	Tipo de Suelo.
Lutita, Chert, Conglomerado, Caliza, Grauvaca y Conglomerado, Andesita.	Vegetación arbustiva y herbácea.	Media	Franco Arcilloso
Tobas, aglomerados, Andesitas.	Vegetación arbustiva y herbácea.	Media	Franco Arcilloso
Tobas.	Vegetación arbustiva y herbácea.	Media	Franco Arcilloso

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

- Humedad del suelo inicial (mm/m): se considera al contenido de humedad al inicio del período de cultivo, y se estima como una diferencia de humedades entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$)

  Para conocer la cantidad de agua disponible para el cultivo o Agua Disponible Total (ADT) se tiene:

$$\boldsymbol{ADT = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r} \tag{3.48}$$

  Donde,
  $\theta_{FC} = contenido\ de\ humedad\ a\ capacidad\ de\ campo$
  $\theta_{WP} = contenido\ de\ humedad\ en\ el\ punto\ de\ marchitez\ pemanente$
  $Z_r = profundidad\ de\ las\ raices\ (m)$

  Los valores de humedad para diferentes tipos de suelo se presentan en la TABLA 21.

TABLA 21 Humedades típicas para diferentes tipos de suelo.

Tipo de Suelo	Características de la humedad del suelo		
	$\boldsymbol{\theta_{FC}}$	$\boldsymbol{\theta_{WP}}$	$\boldsymbol{(\theta_{FC} - \theta_{WP})}$
Arenoso	0.07 – 0.17	0.02 – 0.07	0.05 – 0.11
Arenoso Franco	0.11 – 0.19	0.03 – 0.10	0.06 – 0.12

Tipo de Suelo	Características de la humedad del suelo		
	θ_{FC}	θ_{WP}	$(\theta_{FC} - \theta_{WP})$
Franco Arenoso	0.18 – 0.28	0.06 – 0.16	0.11 – 0.15
Franco	0.20 – 0.30	0.07 – 0.17	0.13 – 0.18
Franco Limoso	0.22 – 0.36	0.09 – 0.21	0.13 – 0.19
Limoso	0.28 – 0.36	0.12 – 0.22	0.16 – 0.20
Franco Arcillo Limoso	0.30 – 0.37	0.17 – 0.24	0.13 – 0.18
Arcillo Limoso	0.30 – 0.42	0.17 – 0.29	0.13 – 0.19
Arcilloso	0.32 – 0.40	0.20 – 0.24	0.12 – 0.20

Fuente: FAO, 2006

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

- Tasa máxima de infiltración (mm/día): es la lámina de agua que el suelo puede infiltrar durante de 24 horas, y representa el valor de la conductividad hidráulica del suelo saturado. Los valores de la infiltración básica de diferentes texturas de suelo se muestran en la TABLA 22.

TABLA 22 Resumen de las propiedades físicas para diferentes tipos de suelo.

Textura del suelo	Densidad aparente (g/cm^3)	Infiltración básica (mm/h)
Arenoso	1.65 (1.55 – 1.90)	50 (25 – 250)
Franco arenoso	1.50 (1.40 – 1.60)	25 (13 – 75)
Franco	1.40 (1.35 – 1.50)	13 (8 – 20)
Franco arcilloso	1.35 (1.30 – 1.40)	8 (2.5 – 15)
Arcilloso	1.25 (1.20 – 1.30)	5 (1.3 – 10)

Fuente: Mihajlovich, 1979

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

- Profundidad radicular máxima (cm): determinada por las características genéticas de los cultivos (TABLA 18).

- Agotamiento Inicial de la humedad del suelo (%): es la sequedad del suelo al inicio del período de cultivo, se puede asumir como cero cuando una capa superficial de suelo se acerca a la capacidad de campo luego de una lluvia pesada o riego.

3.4.2 VARIABLES DEL MODELO

El programa CROPWAT, software de la FAO desarrollado para la programación de riego, posee diferentes módulos divididos tanto para la entrada de datos como para el cálculo.

El procedimiento del CROPWAT ha sido establecido mediante las guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, FAO (2006), por lo que los módulos para el ingreso de datos, son:

- Clima/ETo: permite el ingreso de datos mensuales de: temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), humedad (%), viento (km/día), insolación (horas), con la finalidad de calcular la evapotranspiración utilizando la radiación y el método de Penman – Monteith

- Precipitación: Es importante señalar que en las configuraciones del programa el cálculo de la precipitación puede ser seleccionado mediante varios métodos, como son: porcentaje fijo, formula empírica, USDA servicio de conservación, no considerar la precipitación en los cálculos de riego y precipitación efectiva. Este último fue el método aplicado en el presente estudio, donde se ocuparon los datos analizados de la TABLA 15 que son el promedio de la media multianual de las estaciones M393 y M394, para el cálculo de la precipitación efectiva (mm/mes) mediante la fórmula de la FAO/AGLW. Esta fórmula estima una precipitación con un 80% de probabilidad de excedencia, como un efecto combinado de ésta y de las pérdidas estimadas por escorrentía superficial y percolación profunda.

- Cultivo**:** permite el ingreso de datos del cultivo y el periodo de siembra. Los datos requeridos son: nombre de cultivo, fecha de la siembra, coeficiente de cultivo (Kc), etapas de crecimiento (inicial, desarrollo, mediados de temporada y final), profundidad radicular (capacidad de un cultivo para aprovechar el agua en el suelo), fracción de agotamiento crítico (p, es el nivel de humedad crítica desde donde se produce estrés por falta de agua) y factor de respuesta del rendimiento (reducción del rendimiento po el déficit de evapotranspiración relativa).

- Suelo: permite el ingreso de datos del suelo, en donde se realiza la siembra, y se requiere los siguientes parámetros: humedad del suelo inicial (mm/m), la tasa máxima de infiltración de la precipitación (mm/día), profundidad radicular máxima (cm), agotamiento Inicial de la humedad del suelo (%).

- Patrón de cultivo: permite realizar una programación para la entrega del recurso hídrico, para varios cultivos en un área de trabajo o estudio.

3.5 OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE RIEGO VIRGEN DE LAS NIEVES

3.5.1 AJUSTE DE LAS DEMANDAS MEDIANTE CROPWAT

El manejo de CROPWAT posibilita el uso del recurso hídrico de una forma eficiente y adecuada en los sistemas de riego, ya que permite establecer el requerimiento tecnificado de los cultivos mediante los datos climáticos, de suelo y tipo de cultivo.

Mediante varias campañas de aforo en el Sistema de Riego Virgen de las Nieves, se establecerá la cantidad de agua utilizada en los diferentes cultivos de estudio, según los turnos de agua asignados. En los resultados de este estudio, los aforos serán comparados con los requerimientos establecidos por el software CROPWAT, de esta manera se podrá conocer si existe un déficit o un sobrante del recurso hídrico en el sistema de riego.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA

4.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA

En la FIGURA 13, se determinó el mapa base de la cuenca del río Chibunga, donde se especifica el área de la comunidad de estudio, Virgen de las Nieves. El coeficiente de compacidad y su factor de forma, se calculan de la siguiente manera:

$$K_c = 0.282 * 131/\sqrt{308.55} = 2.08;$$

$$K_f = \frac{308.55}{33^2} = 0.28$$

La cuenca del río Chibunga se encuentra en la región interandina, tiene un área de 308.5 km2 y un perímetro de 131 km, posee un coeficiente de compacidad de 2.08 y un factor de forma de 0.28. Esto implica que la cuenca es alargada, con poca tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa para formar grandes crecidas. Además, según las bifurcaciones de sus cauces es una corriente de tercer orden. Sus elevaciones varían desde los 3035 m s.n.m. en el punto de cierre, hasta los 6242 m s.n.m en el nevado Chimborazo.

La red de drenaje de la cuenca del rio Chibunga, fue determinada en el software ArcGIS, mediante la herramienta ArcSWAT, estableciendo como punto de cierre la estación hidrológica H0785, obteniendo así, que el grado de los cauces dentro de esta cuenca es de orden 3, (FIGURA 21).

FIGURA 21 Orden de la red drenaje de la cuenca del rio Chibunga

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La cuenca del rio Chibunga se divide en nueve (9) subcuencas, FIGURA 22, que tienen las características mostradas en la TABLA 23. La comunidad de interés, Virgen de las Nieves, se encuentra en la subcuenca No. 7 y su principal afluente es la Quebrada Salada.

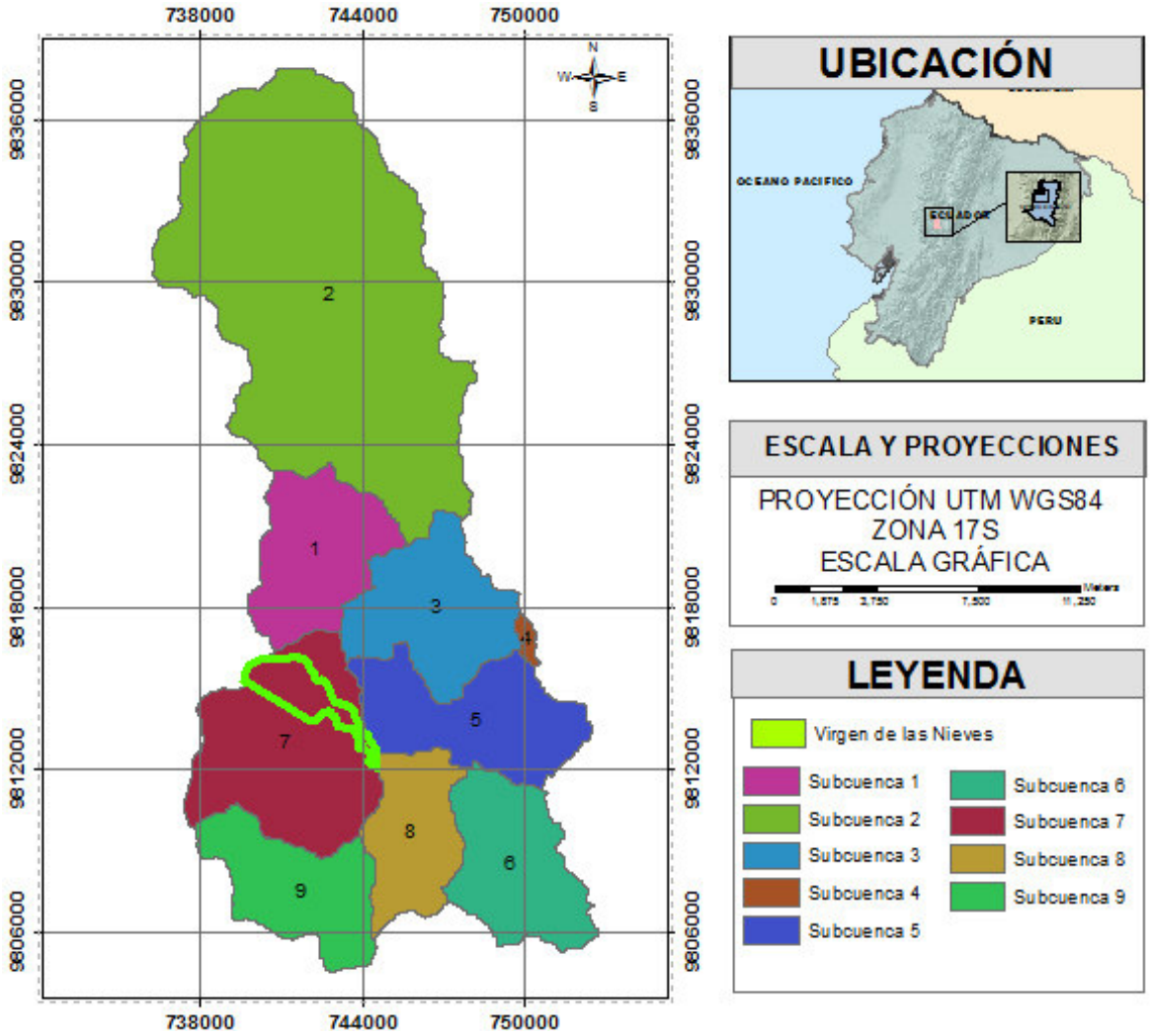


FIGURA 22 Subcuencas de la Cuenca del rio Chibunga y Comunidad de la Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

TABLA 23 Características de las subcuencas de río Chibunga.

Subcuenca	Área (km^2)	Rango Cotas (m s.n.m)		Cauce Principal
1	24.19	4123	3239	Río Chibunga
2	123.57	6242	3239	Río Chimborazo
3	26.53	3938	3062	Río Chibunga
4	1.00	3062	3038	Río Chibunga
5	27.07	3978	3062	Río Sicalpa

Subcuenca	Área (km^2)	Rango Cotas (m s.n.m)		Cauce Principal
6	24.57	3598	3192	Q. S/N
7	40.91	4165	3367	Q. Salada
8	18.49	3936	3192	Río Sicalpa
9	22.22	4224	3367	Río Sicalpa

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.1.2 VARIABLES METEOROLÓGICAS

4.1.2.1 Precipitación

Los vacíos de la estación M393 se rellenaron con la media mensual (TABLA A5. 1). Se realizaron las curvas de variación media mensual de la precipitación (FIGURA 23) mostrando que se presenta un comportamiento bimodal, con dos períodos húmedos en los meses de febrero a mayo y de septiembre a noviembre, alcanzando un valor máximo de 209 mm por mes. Se presentan también dos períodos secos que se observan en los meses de junio - agosto y de diciembre – enero.

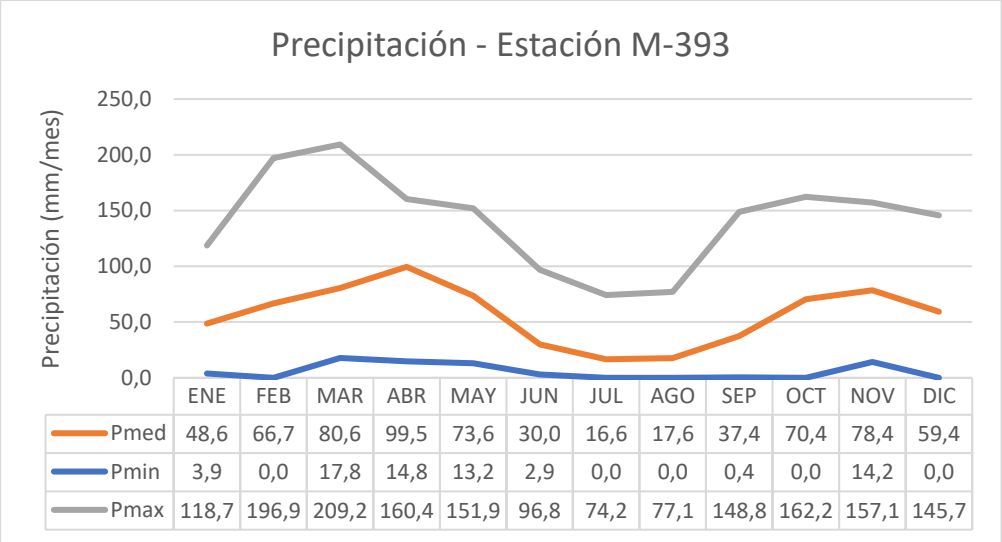


FIGURA 23 Curva de variación media mensual de la precipitación usando la estación M393.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Los datos de la estación M394 se rellenaron mediante el método de correlación – regresión usando como base la estación M393. El coeficiente de correlación para el relleno de datos es 0.7, por lo que se realizó este proceso mediante la ecuación de la FIGURA 24. Los datos rellenados se muestran en la TABLA A5. 2.

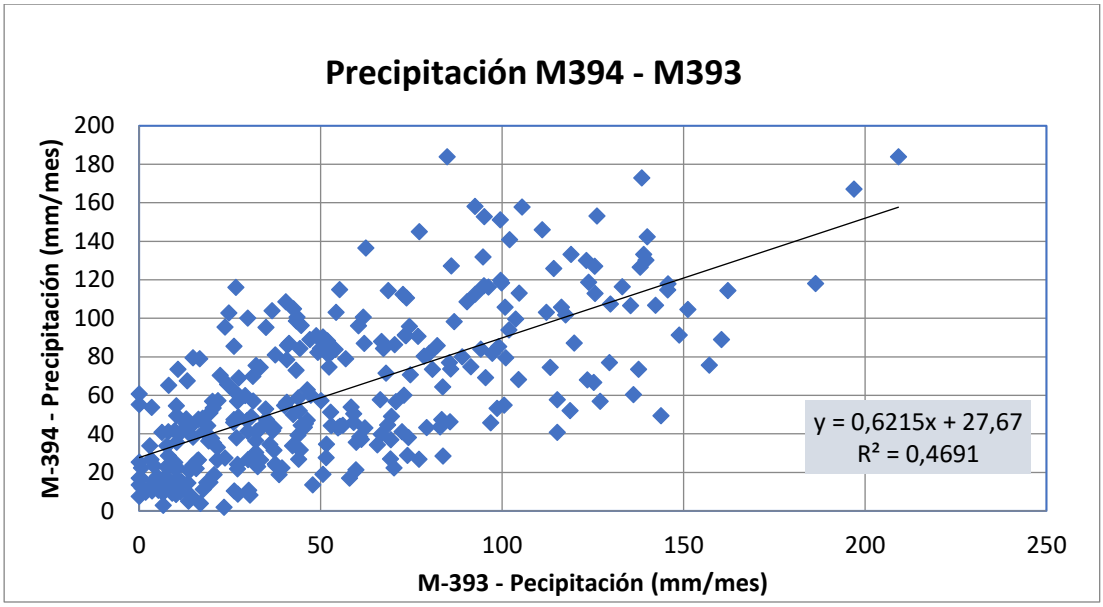
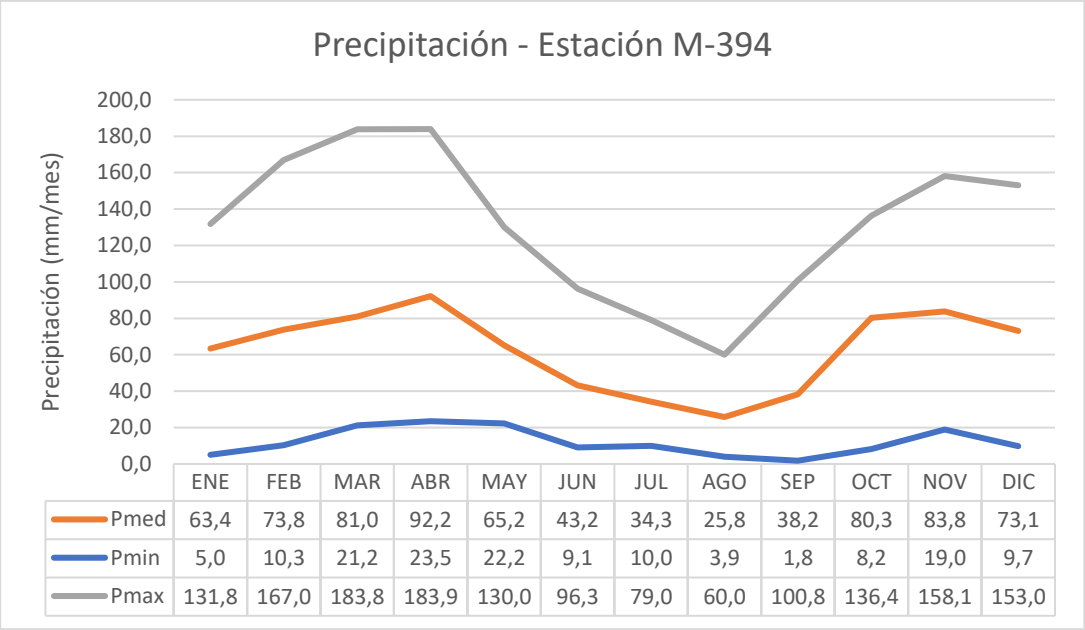


FIGURA 24 Correlación entre las estaciones M394 y M393 para Precipitación media mensual.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La FIGURA 25 muestra el comportamiento de la precipitación media mensual de la estación M394, éste es bimodal con períodos húmedos de febrero a mayo y de septiembre a noviembre alcanzando un valor máximo de 183.9 mm por mes; y con dos períodos secos en los meses de junio a agosto y de diciembre a enero.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pmed	63,4	73,8	81,0	92,2	65,2	43,2	34,3	25,8	38,2	80,3	83,8	73,1
Pmin	5,0	10,3	21,2	23,5	22,2	9,1	10,0	3,9	1,8	8,2	19,0	9,7
Pmax	131,8	167,0	183,8	183,9	130,0	96,3	79,0	60,0	100,8	136,4	158,1	153,0

FIGURA 25 Curva de variación media mensual de la precipitación usando la estación M394.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.1.2.2 Temperatura

Los vacíos de la estación M-258 para la variable de la temperatura se rellenaron con el método correlación – regresión utilizando como base los datos de la estación M-133. El coeficiente de correlación en este caso es de 0.78 y la ecuación para el relleno de los datos se muestra en la FIGURA 26. La TABLA A5. 3 muestra los datos de temperatura de esta estación aplicando esta metodología.

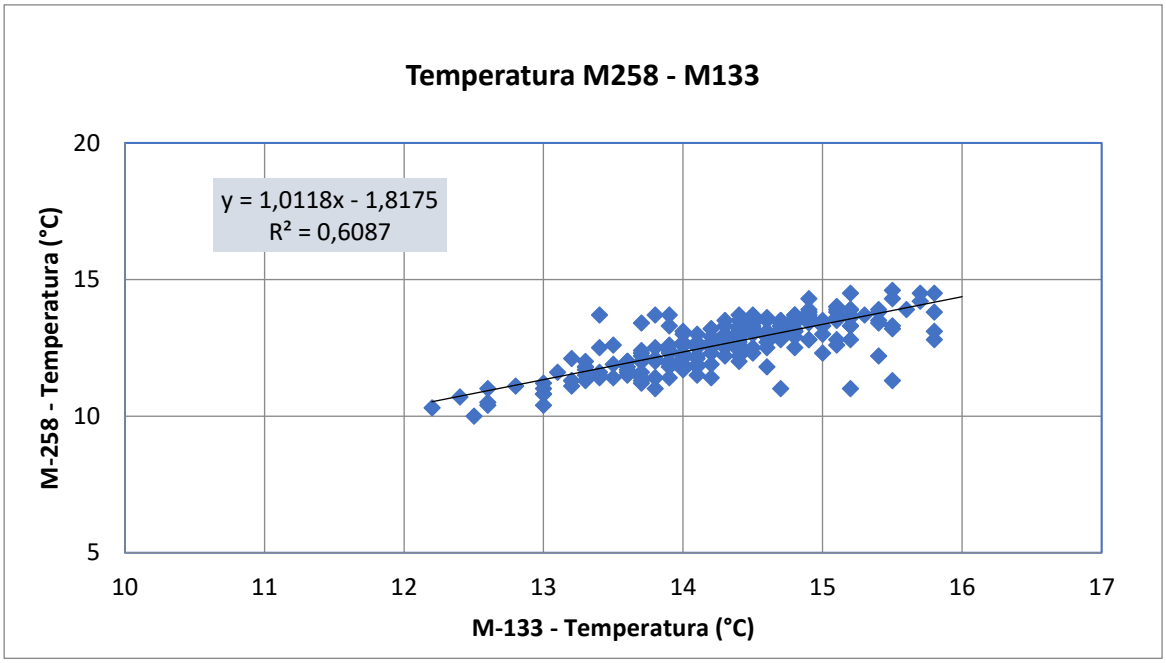
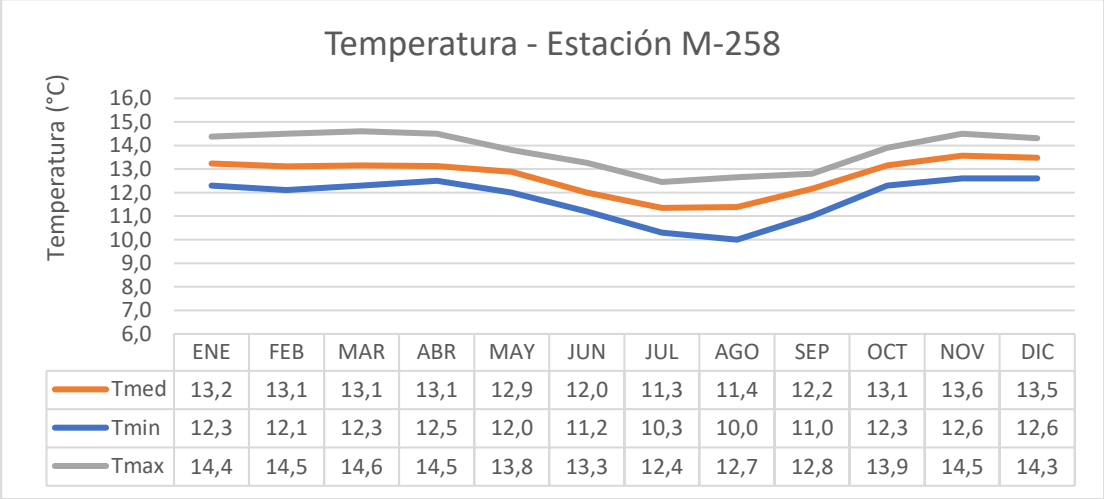


FIGURA 26 Correlación entre las estaciones M258 y M133 para Temperatura media mensual.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Las curvas de variación media mensual para la temperatura, en la estación M-258 muestra un comportamiento casi lineal con una baja de temperatura en los meses de junio a septiembre (FIGURA 27). El rango de temperatura que se presenta es de 10 a 14.6°C, esta estación se encuentra a una altitud de 2865.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Tmed	13,2	13,1	13,1	13,1	12,9	12,0	11,3	11,4	12,2	13,1	13,6	13,5
Tmin	12,3	12,1	12,3	12,5	12,0	11,2	10,3	10,0	11,0	12,3	12,6	12,6
Tmax	14,4	14,5	14,6	14,5	13,8	13,3	12,4	12,7	12,8	13,9	14,5	14,3

FIGURA 27 Curva de variación de la temperatura media mensual de la estación M-258.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

El primer año de los datos faltantes de temperatura en la estación M-133 se lo hizo con la media mensual y el resto de los datos faltantes con el método correlación – regresión, utilizando como base los datos de la estación M-258. Mediante la ecuación de la FIGURA 28, el coeficiente de correlación es 0.78. Los datos rellenados se muestran en la TABLA A5. 4.

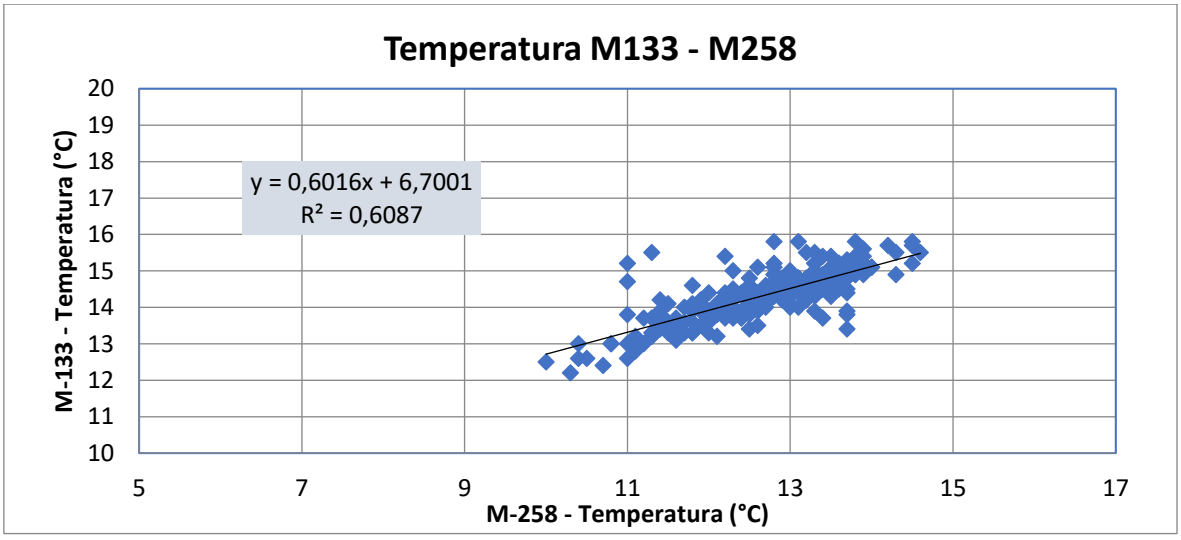
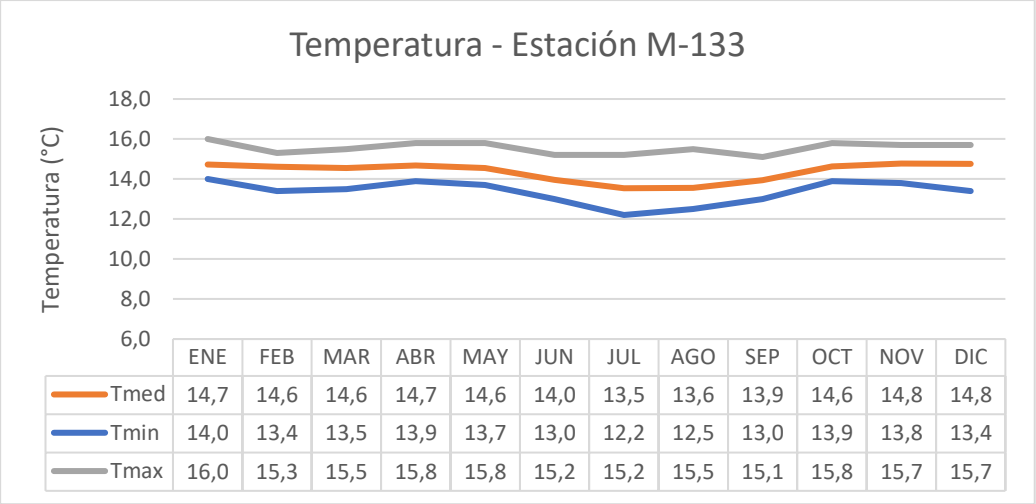


FIGURA 28 Correlación entre las estaciones M133 y M258 para Temperatura media mensual.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La estación M-133 presenta un comportamiento casi lineal, que varía entre 12 y 15°C, siendo las menores en los meses de julio y agosto, como se observa en la FIGURA 29



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Tmed	14,7	14,6	14,6	14,7	14,6	14,0	13,5	13,6	13,9	14,6	14,8	14,8
Tmin	14,0	13,4	13,5	13,9	13,7	13,0	12,2	12,5	13,0	13,9	13,8	13,4
Tmax	16,0	15,3	15,5	15,8	15,8	15,2	15,2	15,5	15,1	15,8	15,7	15,7

FIGURA 29 Curva de variación de la temperatura media mensual de la estación M-133

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

De acuerdo con los resultados de la temperatura de las dos estaciones analizadas, éstas mantienen un comportamiento similar, sin embargo, se encuentran fuera de la cuenca de estudio ubicadas al norte y sur de la misma. La estación M258 (2865 m.s.n.m.) presenta una altitud superior en 15 m de la estación M133 (2850 m.s.n.m.) y muestra que la temperatura tiende a bajar en una pequeña magnitud a medida que aumenta la altitud. Se esperaría que las captaciones, las cuales se encuentran a una altitud de alrededor de los 3800 m.s.n.m. presenten temperaturas inferiores pero cercanas a las estaciones analizadas, esto es entre 1 a 10°C.

4.1.2.3 Evaporación

Los vacíos de la estación M258 se rellenaron con la media mensual y con la ecuación de la correlación – regresión teniendo como base la estación M128 (FIGURA 30). El coeficiente de correlación en este caso es de 0.79 y los datos rellenados se muestran en la TABLA A5. 5

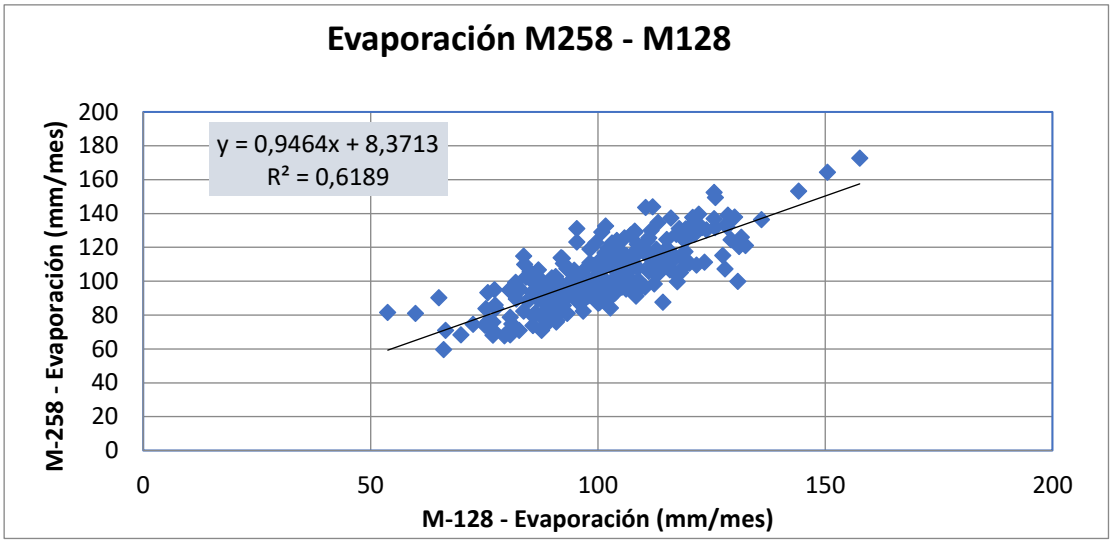
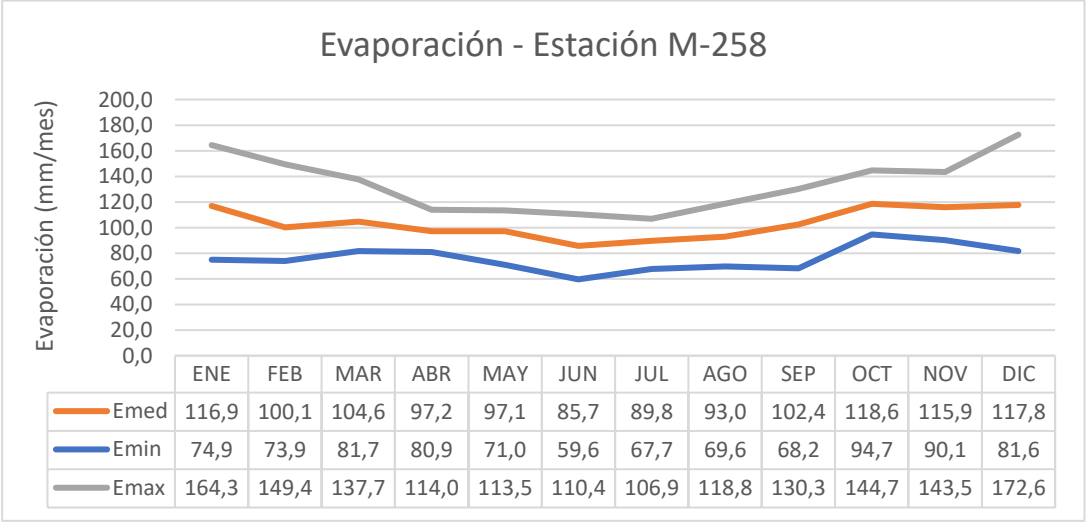


FIGURA 30 Correlación entre las estaciones M258 y M128 para Evaporación media mensual.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Las curvas de variación media mensual para la evaporación muestran los valores más altos en los meses de octubre a marzo para la estación M258 (FIGURA 31), el rango que se presenta es de 59.6 a 172.9 mm por mes. La mayor evaporación se da debido al incremento de temperatura coincide y es consistente con el período seco de la cuenca.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Emed	116,9	100,1	104,6	97,2	97,1	85,7	89,8	93,0	102,4	118,6	115,9	117,8
Emin	74,9	73,9	81,7	80,9	71,0	59,6	67,7	69,6	68,2	94,7	90,1	81,6
Emax	164,3	149,4	137,7	114,0	113,5	110,4	106,9	118,8	130,3	144,7	143,5	172,6

FIGURA 31 Curva de variación de la evaporación media mensual de la estación M-258.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

El relleno de la estación M128 se realizó aplicando el método de correlación – regresión usando como base la estación M258 la ecuación se muestra en la FIGURA 32. Los datos rellenados para la evaporación media mensual se muestran en la TABLA A5. 6

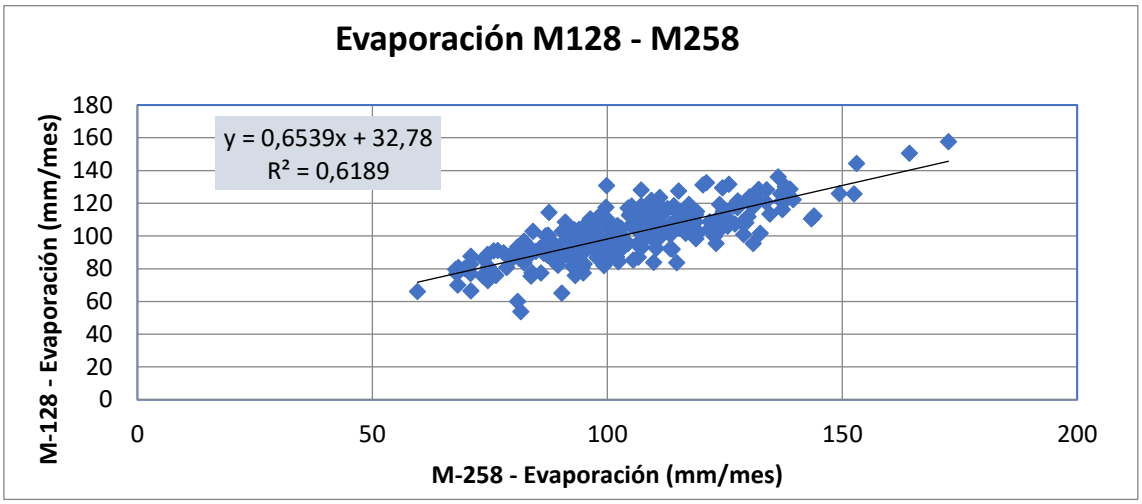
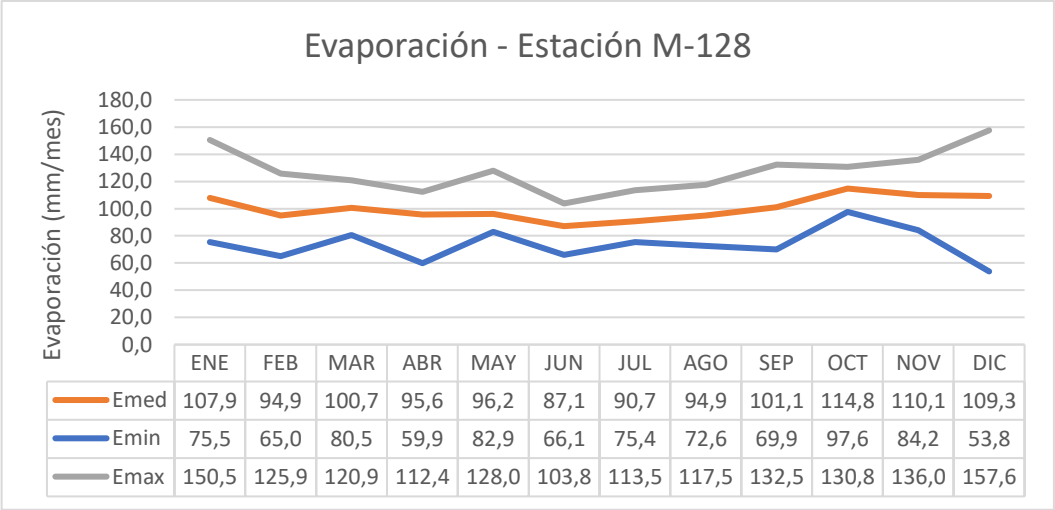


FIGURA 32 Correlación entre las estaciones M128 y M258 para Evaporación media mensual.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La estación M128 tiene un comportamiento uniforme con un incremento en los meses de octubre a marzo (FIGURA 33). El rango de evaporación que se presenta va desde 53.8 a 157.6 mm por mes.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Emed	107,9	94,9	100,7	95,6	96,2	87,1	90,7	94,9	101,1	114,8	110,1	109,3
Emin	75,5	65,0	80,5	59,9	82,9	66,1	75,4	72,6	69,9	97,6	84,2	53,8
Emax	150,5	125,9	120,9	112,4	128,0	103,8	113,5	117,5	132,5	130,8	136,0	157,6

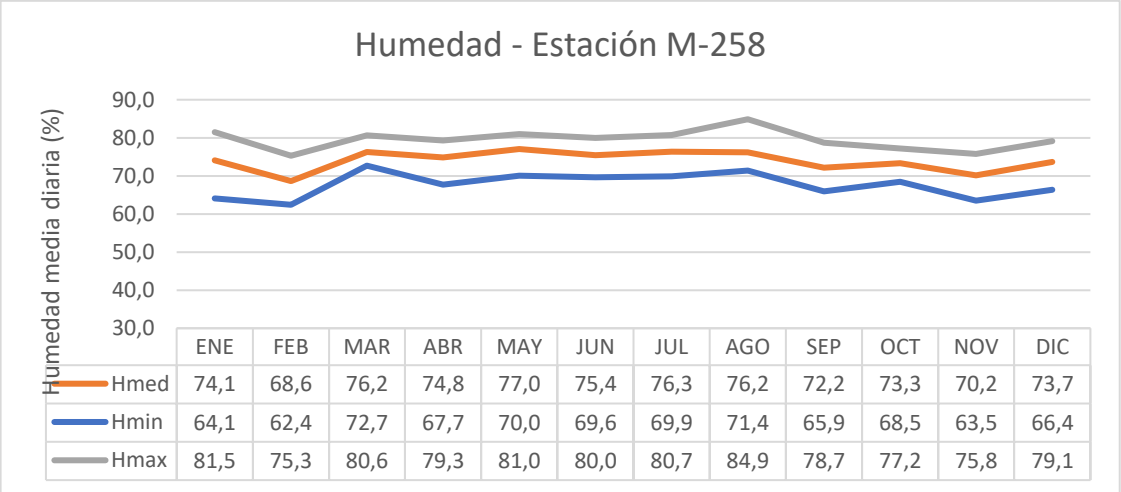
FIGURA 33 Curva de variación de la evaporación media mensual de la estación M-128.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.1.2.4 Humedad

Debido a la baja correlación, menor a 0.25, que existe entre las estaciones analizadas y a que el período de datos faltantes es menor a 5 años, se realizó el relleno de datos faltantes con los valores de la media mensual, tanto para la estación M258 como para la estación M133. Los datos rellenados se muestran en la TABLA A5. 7 y TABLA A5. 8

Las curvas de variación media mensual para la humedad muestran un comportamiento lineal para la estación M258, teniéndose los valores más bajos en los meses de octubre a febrero (FIGURA 34). El rango de valores de humedad va desde 62.4 hasta 84.9%. Se observa que en los períodos de mayor temperatura se presentan las menores humedades.

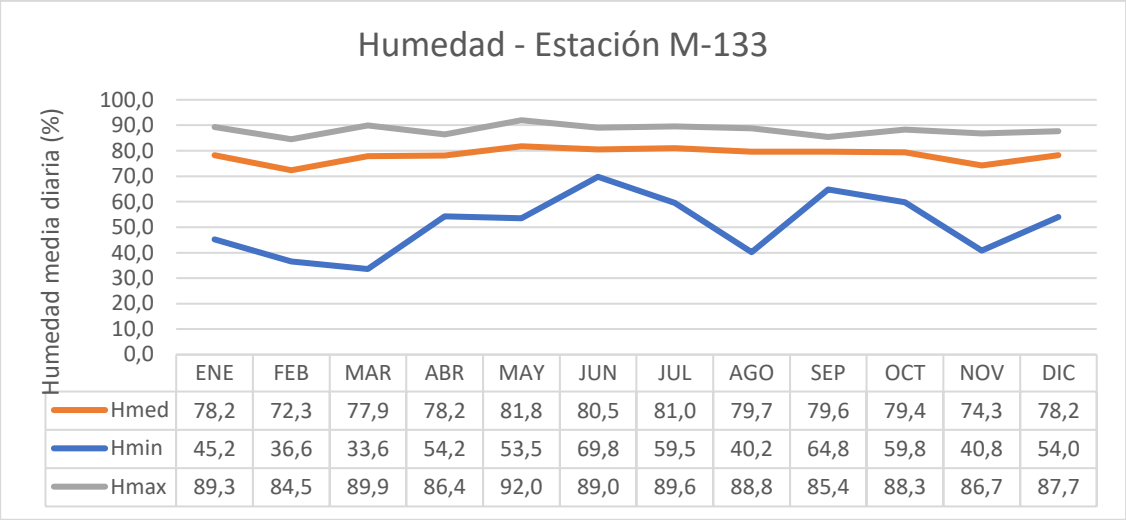


	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Hmed	74,1	68,6	76,2	74,8	77,0	75,4	76,3	76,2	72,2	73,3	70,2	73,7
Hmin	64,1	62,4	72,7	67,7	70,0	69,6	69,9	71,4	65,9	68,5	63,5	66,4
Hmax	81,5	75,3	80,6	79,3	81,0	80,0	80,7	84,9	78,7	77,2	75,8	79,1

FIGURA 34 Curva de variación de la humedad media mensual de la estación M-258.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

En el caso de la estación M133 se presenta un comportamiento casi lineal en el caso de los valores medios y máximos, teniendo un promedio de 78.43% y 88.13% respectivamente (FIGURA 35).



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Hmed	78,2	72,3	77,9	78,2	81,8	80,5	81,0	79,7	79,6	79,4	74,3	78,2
Hmin	45,2	36,6	33,6	54,2	53,5	69,8	59,5	40,2	64,8	59,8	40,8	54,0
Hmax	89,3	84,5	89,9	86,4	92,0	89,0	89,6	88,8	85,4	88,3	86,7	87,7

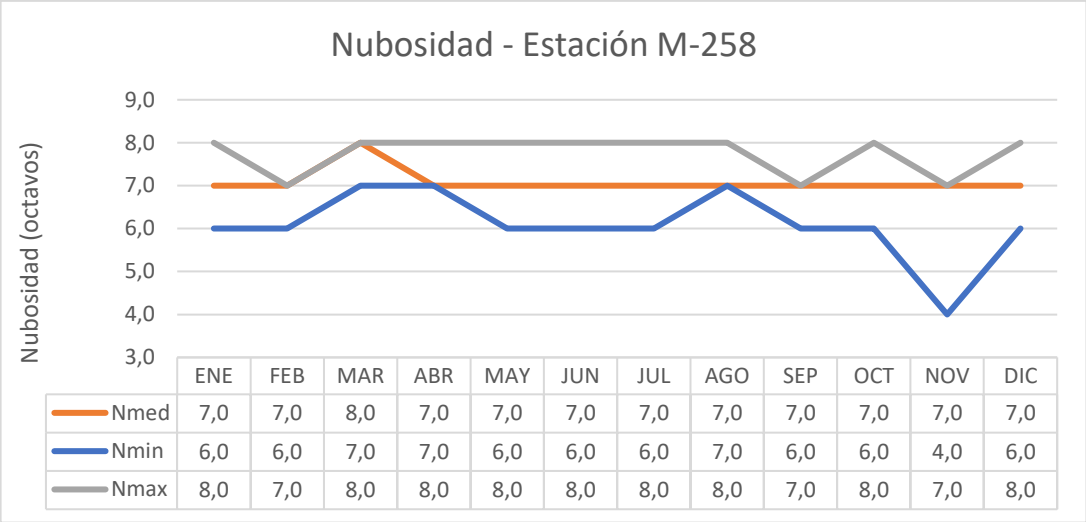
FIGURA 35 Curva de variación de la humedad media mensual de la estación M-133.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.1.2.5 Nubosidad

Los vacíos en los datos de nubosidad de la estación M258 se rellenaron con la media mensual, ya que no presenta una buena correlación con otras estaciones. Además, la información disponible para esta variable climática es escasa. La TABLA A5. 9 muestra los datos rellenados.

Las curvas de variación media mensual para la nubosidad utilizando la estación M-258, muestran que se manejan en un rango entre 6 y 8 octavos. Este comportamiento se muestra en la FIGURA 36



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Nmed	7,0	7,0	8,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Nmin	6,0	6,0	7,0	7,0	6,0	6,0	6,0	7,0	6,0	6,0	4,0	6,0
Nmax	8,0	7,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	7,0	8,0	7,0	8,0

FIGURA 36 Curva de variación de la nubosidad media mensual de la estación M-258.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.1.2.6 Tensión de vapor

Para el análisis de la tensión de vapor, se trabajó con la estación M-258, ya que es la única estación que cuenta con información en la zona, ante la poca disponibilidad de información y considerando que los datos faltantes corresponden a un periodo menor a 5 años, se rellenó la serie con los valores medios mensuales. La TABLA A5. 10con los datos rellenados se muestra en el Anexo 5.

Las curvas de variación media mensual para la tensión de vapor utilizando la estación M-258 (FIGURA 37), muestran una variación de sus valores entre 9 y 12HPa, siendo los mayores en los meses de noviembre a febrero.

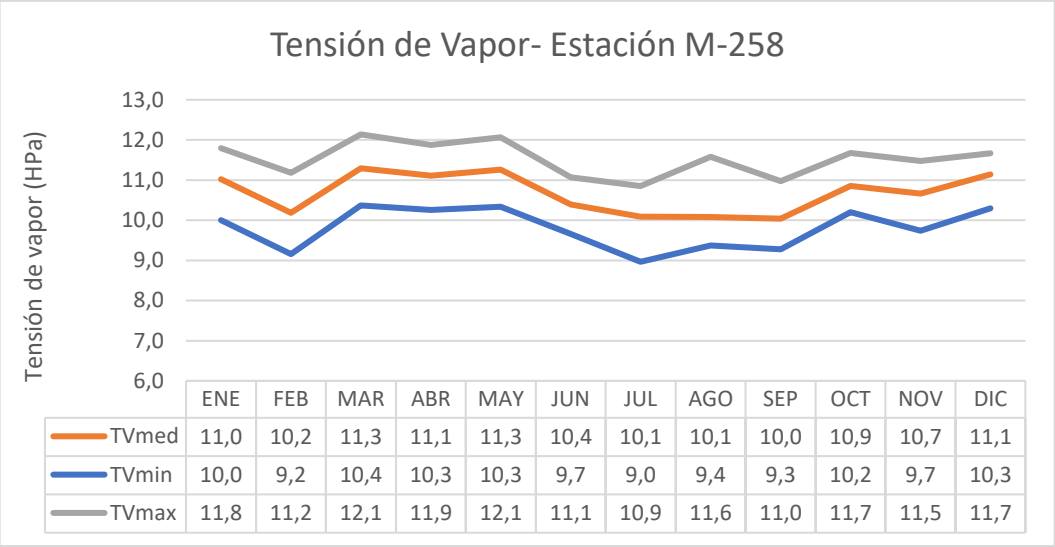


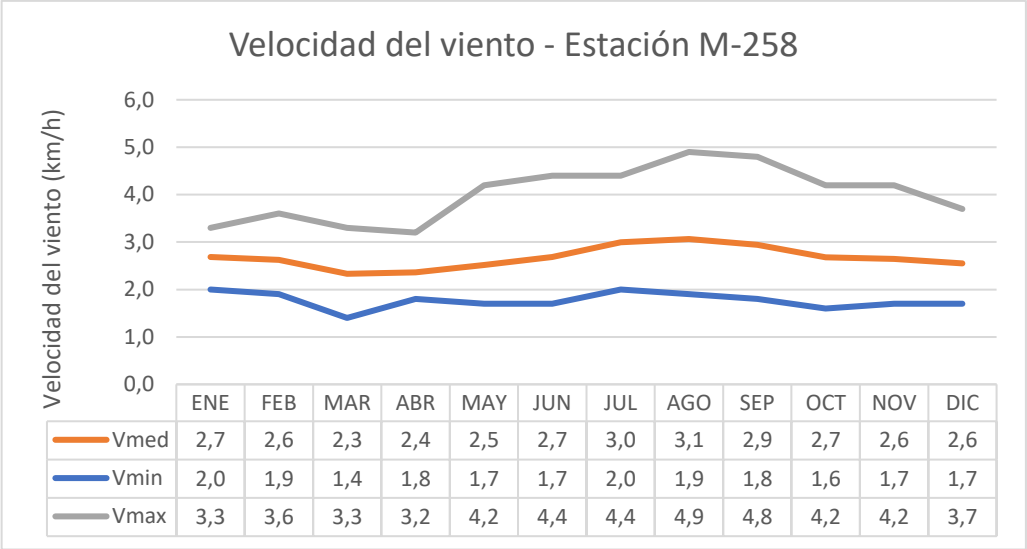
FIGURA 37 Curva de variación de la tensión de vapor media mensual de la estación M-258.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.1.2.7 Velocidad de viento

Debido a la falta de datos de la velocidad de viento, tanto de la estación M258 como de estaciones aledañas analizadas, no se realizó el relleno de vacíos de los datos. Se utilizaron como base para el análisis los valores disponibles que tienen un período de datos mayor a 10 años y se muestra en la TABLA A1. 11.

Las curvas de variación estacional de la velocidad de viento (FIGURA 38) generadas con la información disponible, muestran las mayores velocidades entre los meses de julio y septiembre, teniendo un rango de valores entre 1.4 y 4.9 km/h.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Vmed	2,7	2,6	2,3	2,4	2,5	2,7	3,0	3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
Vmin	2,0	1,9	1,4	1,8	1,7	1,7	2,0	1,9	1,8	1,6	1,7	1,7
Vmax	3,3	3,6	3,3	3,2	4,2	4,4	4,4	4,9	4,8	4,2	4,2	3,7

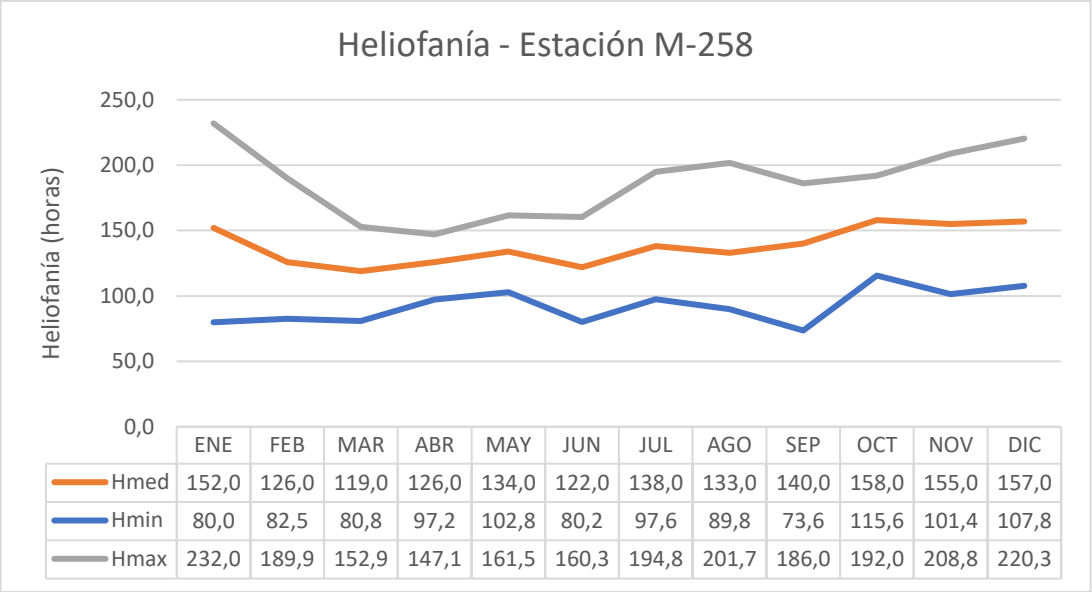
FIGURA 38 Curva de variación del viento media mensual de la estación M-258.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.1.2.8 Heliofanía

Debido a la falta de información de la heliofanía, tanto de la estación M258 como de estaciones aledañas analizadas, no se realizó el relleno de vacíos de los datos y se utilizaron como base para el análisis los valores disponibles que tienen un período de datos mayor a 10 años y se muestra en la TABLA A1. 12.

Las curvas de variación estacional generadas con la información disponible se muestran en el FIGURA 39, donde los menores valores se dan en los meses de febrero a abril y los mayores en el período entre octubre y enero.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Hmed	152,0	126,0	119,0	126,0	134,0	122,0	138,0	133,0	140,0	158,0	155,0	157,0
Hmin	80,0	82,5	80,8	97,2	102,8	80,2	97,6	89,8	73,6	115,6	101,4	107,8
Hmax	232,0	189,9	152,9	147,1	161,5	160,3	194,8	201,7	186,0	192,0	208,8	220,3

FIGURA 39 Curva de variación de heliofanía media mensual de la estación M-258.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.1.2.9 Clasificación del clima

De acuerdo, a la clasificación climática de Pourrut, el clima en la cuenca es ecuatorial frío de alta montaña, ya que tiene una cota sobre los 3000 m.s.n.m., la temperatura no sobrepasa los 20°C, la humedad relativa llega a ser superior al 80% y tiene 2 estaciones lluviosas y dos secas.

De acuerdo con la clasificación climática de Naranjo, la cuenca tiene un clima térmico altitudinal entre temperado y frío, y presenta un clima pluviométrico de semihúmedo a húmedo, con un régimen anual de lluvias interandino.

Las dos clasificaciones, describen adecuadamente la realidad de la cuenca pese a las limitaciones con la disponibilidad de datos meteorológicos.

4.1.3 VARIABLES HIDROLÓGICAS

La estación H-787 es la que cuenta con un mayor número de datos, los vacíos de esta estación se rellenaron con los valores medios mensuales (TABLA A6. 1 - Anexo 6).

Las curvas de duración general (CDG) de la estación H-787 representada en la FIGURA 40, muestra que la cuenca presenta caudales uniformes con capacidad de autorregulación e infiltración posiblemente debido a la existencia de una buena cubertura vegetal (Almeida, 2010). Las tablas de cálculo de las CDG se presentan en al Anexo 7 (TABLA A7. 2).

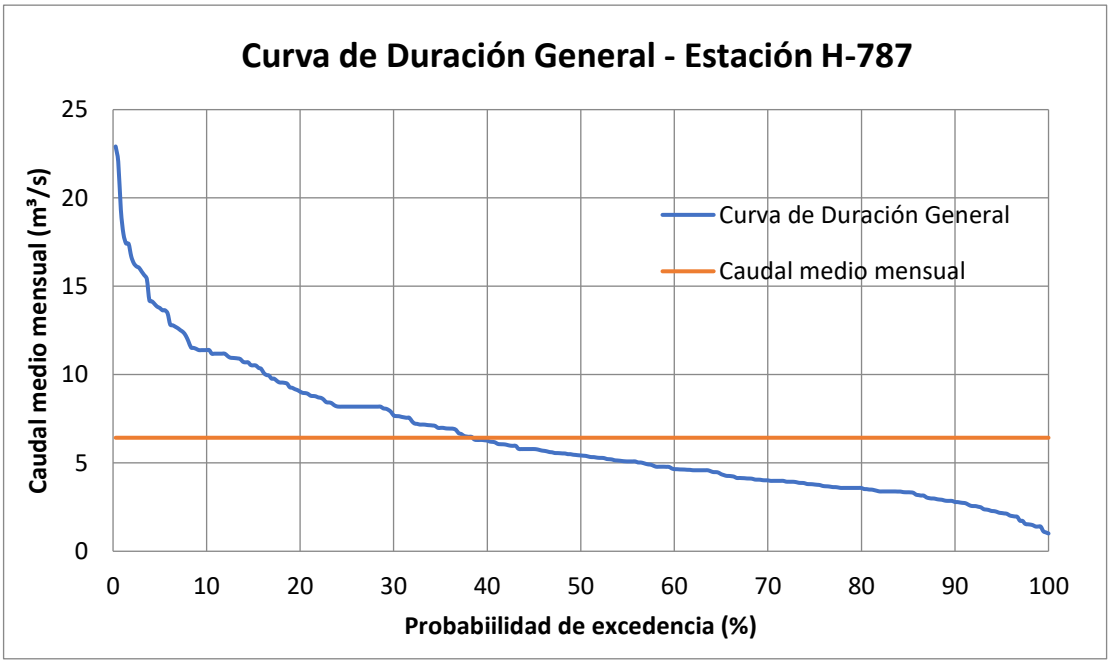
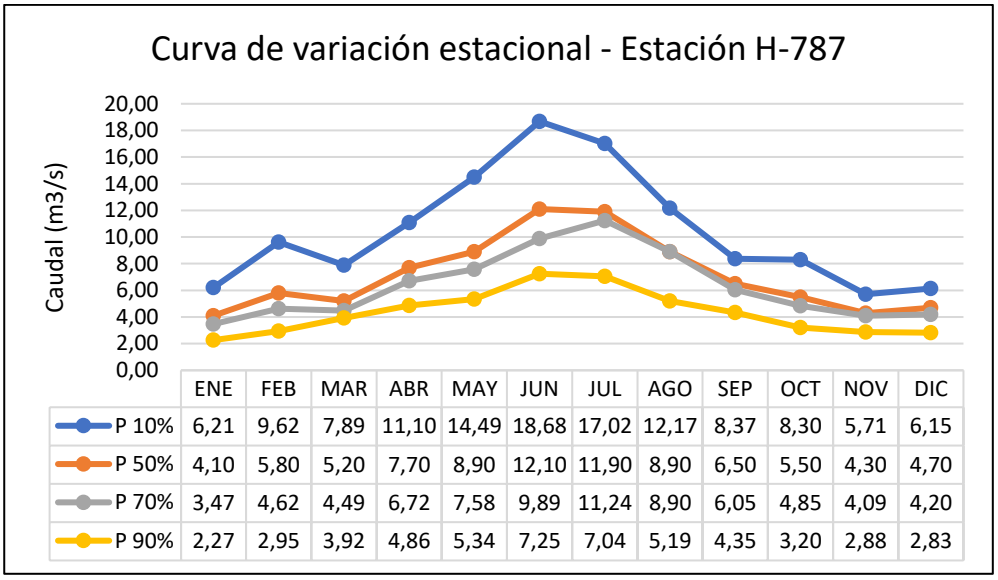


FIGURA 40 Curva de duración general de la estación H-787.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

En la estación H787 se presentan los mayores caudales en los meses de abril a agosto, considerando una probabilidad de excedencia del 10, 50, 70 y 90% (FIGURA 41). Los cálculos utilizados se presentan en la TABLA A8. 2 (Anexo 8).



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
P 10%	6,21	9,62	7,89	11,10	14,49	18,68	17,02	12,17	8,37	8,30	5,71	6,15
P 50%	4,10	5,80	5,20	7,70	8,90	12,10	11,90	8,90	6,50	5,50	4,30	4,70
P 70%	3,47	4,62	4,49	6,72	7,58	9,89	11,24	8,90	6,05	4,85	4,09	4,20
P 90%	2,27	2,95	3,92	4,86	5,34	7,25	7,04	5,19	4,35	3,20	2,88	2,83

FIGURA 41 Curva de variación estacional de la estación H-787.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

En el caso de la estación H764, la ecuación para el relleno de datos se muestra en la FIGURA 42, su coeficiente de correlación es 0.73, lo que implica que los datos de la estación H787 son válidos para realizar este relleno. Los datos rellenados se muestran en la TABLA A6. 3, del Anexo 6.

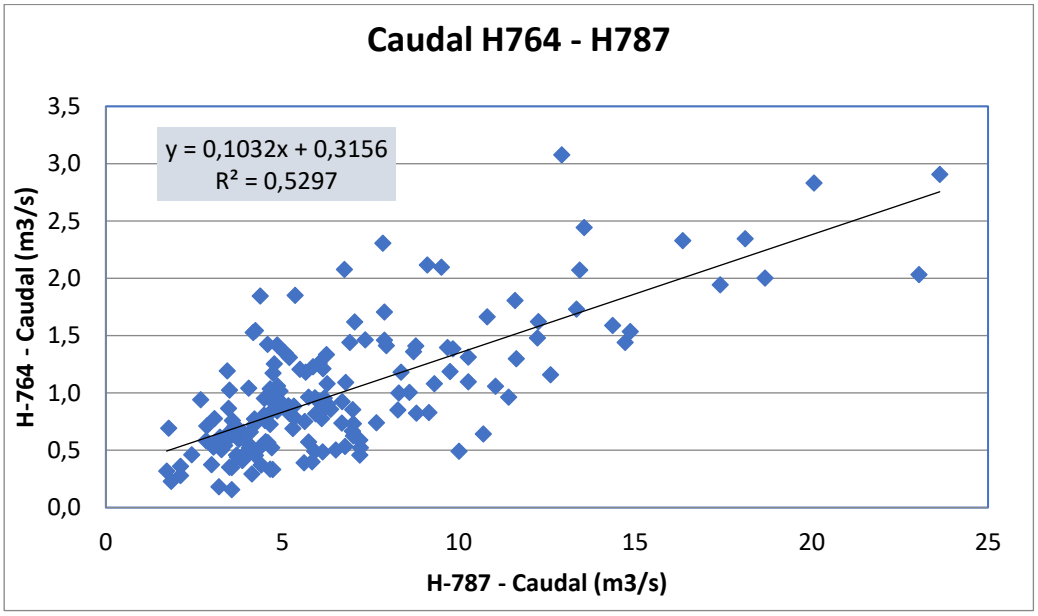


FIGURA 42 Correlación entre las estaciones H764 y H787.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Las curvas de duración general (CDG) de la estación H764 (FIGURA 43), muestra que presenta un comportamiento afín a la estación H787. En la TABLA A7. 1 del Anexo 7, se presentan las tablas de cálculo para las CDG.

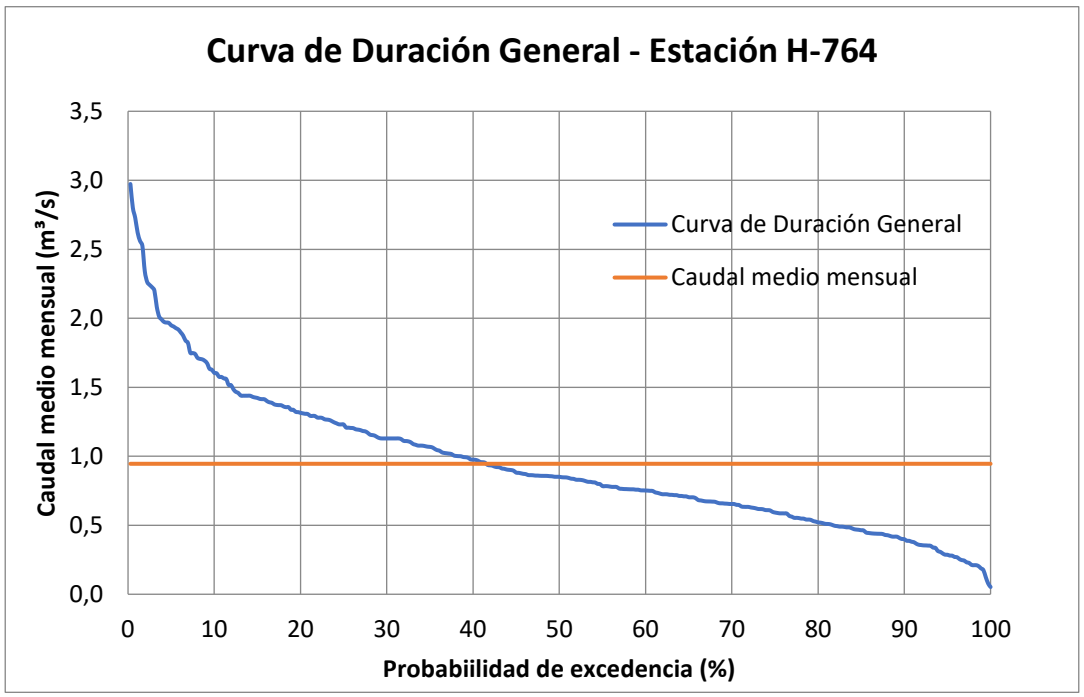
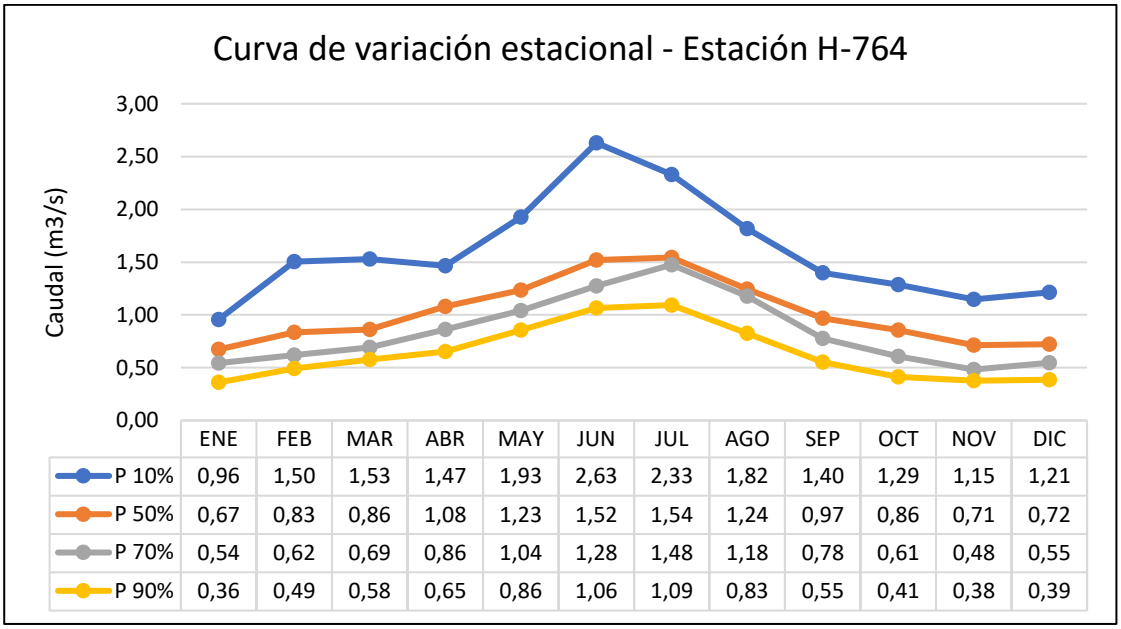


FIGURA 43 Curva de duración general de la estación H-764.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Las curvas de variación estacional (CVE) de la estación H764 se muestran para probabilidades de excedencia del 10, 50, 70 y 90 %. Se puede observar que el período con mayores caudales se da entre los meses de mayo a agosto (FIGURA 44). Los cálculos utilizados se presentan en la TABLA A8. 1 (Anexo 8).



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
P 10%	0,96	1,50	1,53	1,47	1,93	2,63	2,33	1,82	1,40	1,29	1,15	1,21
P 50%	0,67	0,83	0,86	1,08	1,23	1,52	1,54	1,24	0,97	0,86	0,71	0,72
P 70%	0,54	0,62	0,69	0,86	1,04	1,28	1,48	1,18	0,78	0,61	0,48	0,55
P 90%	0,36	0,49	0,58	0,65	0,86	1,06	1,09	0,83	0,55	0,41	0,38	0,39

FIGURA 44 Curva de variación estacional de la estación H-764.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Los vacíos de la estación H-781 se rellenaron con el método correlación – regresión utilizando como base la estación H-787, los datos rellenados se muestran en la TABLA A6. 2 del Anexo 6. El coeficiente de correlación que presentaba es de 0.85, y la ecuación a utilizarse para el relleno de datos se muestra en el FIGURA 45.

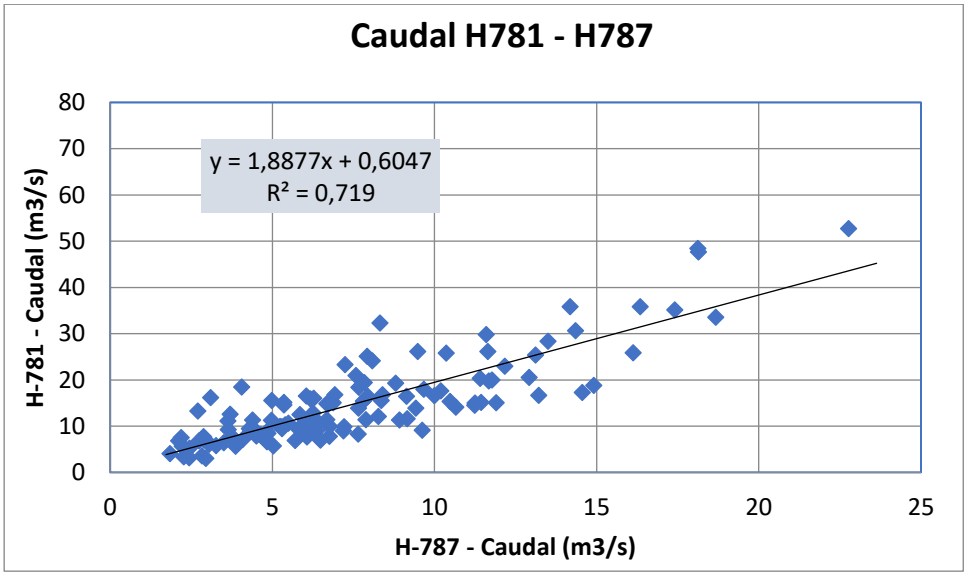


FIGURA 45 Correlación entre las estaciones H781 y H787.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

No se realizó el relleno de datos de la estación H-785 debido a que estos no presentaban una buena correlación con estaciones cercanas. Para la verificación de los métodos de cálculo de caudales se utilizó los datos disponibles mostrados en la TABLA A2. 3 del Anexo 2. Los mayores caudales se presentan en los meses de marzo y de noviembre, comportamiento congruente con las precipitaciones máximas que se presentan dentro de la cuenca.

El resumen de los caudales medios mensuales de los períodos analizados de las cuatro estaciones hidrológicas se muestra en la TABLA 24. La estación H781 al estar acerca a la región del oriente con una altitud de 1495 m.s.n.m., presenta caudales alrededor de 10 veces el valor de la estación de cierre de la cuenca de estudio, por lo que no se consideró para la estimación de caudales en captaciones.

TABLA 24 Caudales obtenidos en base a datos del INAMHI.

ESTACIÓN HIDROLÓGICA		Q medio mensual (m3/s)
CÓDIGO	NOMBRE	
H764	CALAMACA DJ Q.HUARCUSACHA	1.05
H781	VERDE AJ PASTAZA	14.56
H785	CHIBUNGA EN CALPI	1.82
H787	ALAO EN HDA.ALAO	7.14

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.1.3.1 Estimación de caudales

a) Caudal en el cierre de la cuenca – Método SCS

Mediante el análisis de los datos de las pendientes, del grupo hidrológico y de las características semejantes de cobertura y uso del suelo, se obtienen los valores de CN II que se muestran en la TABLA 25 para la cuenca en estudio, esto considerando una condición normal de humedad antecedente

TABLA 25 Número de curva de la cuenca del Chibunga.

PENDIENTE		TEXTURA		USO - COBERTURA		NP Producto	CN Asignado	CN II	ÁREA (km^2)	CN II Ponderado
Descripción	NP	Descripción	NP	Descripción	NP					
<3%	73	A	47	CULTIVOS DE CICLO CORTO	1	3431	52	53	0,367	0,064
>3%	79	A	47	CULTIVOS DE CICLO CORTO	1	3713	54		6,366	1,110
<3%	73	B	53	CULTIVOS DE CICLO CORTO	1	3869	67	73	0,109	0,026
>3%	79	B	53	CULTIVOS DE CICLO CORTO	1	4187	69		2,745	0,659
<3%	73	C	59	CULTIVOS DE CICLO CORTO	1	4307	76		0,038	0,009
>3%	79	C	59	CULTIVOS DE CICLO CORTO	1	4661	78		0,693	0,166
<3%	73	A	47	50% CULTIVOS DE CICLO CORTO - 50% PASTO CULTIVADO	2	6862	35	59	1,479	0,287
>3%	79	A	47	50% CULTIVOS DE CICLO CORTO - 50% PASTO CULTIVADO	2	7426	47		7,502	1,457
<3%	73	B	53	50% CULTIVOS DE CICLO CORTO - 50% PASTO CULTIVADO	2	7738	50		0,012	0,002
>3%	79	B	53	50% CULTIVOS DE CICLO CORTO - 50% PASTO CULTIVADO	2	8374	62		11,351	2,204
<3%	73	C	59	50% CULTIVOS DE CICLO CORTO - 50% PASTO CULTIVADO	2	8614	72		0,026	0,005
>3%	79	C	59	50% CULTIVOS DE CICLO CORTO - 50% PASTO CULTIVADO	2	9322	74		14,550	2,825
<3%	73	A	47	CULTIVOS DE CICLO CORTO EN AREAS EROSIONADAS	3	10293	58		0,189	0,037
>3%	79	A	47	CULTIVOS DE CICLO CORTO EN AREAS EROSIONADAS	3	11139	60		11,747	2,281
<3%	73	B	53	CULTIVOS DE CICLO CORTO EN AREAS EROSIONADAS	3	11607	69		0,025	0,005
>3%	79	B	53	CULTIVOS DE CICLO CORTO EN AREAS EROSIONADAS	3	12561	71	77	7,654	1,940
<3%	73	C	59	CULTIVOS DE CICLO CORTO EN AREAS EROSIONADAS	3	12921	77		0,022	0,006
>3%	79	C	59	CULTIVOS DE CICLO CORTO EN AREAS EROSIONADAS	3	13983	78		2,971	0,753
>3%	79	D	61	CULTIVOS DE CICLO CORTO EN AREAS EROSIONADAS	3	14457	81		0,000	0,000
<3%	73	A	47	70% CULTIVOS DE CICLO CORTO / 30% PASTO CULTIVADO	5	17155	42	55	0,258	0,047
>3%	79	A	47	70% CULTIVOS DE CICLO CORTO / 30% PASTO CULTIVADO	5	18565	50		9,353	1,693
>3%	79	B	53	70% CULTIVOS DE CICLO CORTO / 30% PASTO CULTIVADO	5	20935	65		0,229	0,042
<3%	73	C	59	70% CULTIVOS DE CICLO CORTO / 30% PASTO CULTIVADO	5	21535	73		0,069	0,012

PENDIENTE		TEXTURA		USO - COBERTURA		NP Producto	CN Asignado	CN II	ÁREA (km^2)	CN II Ponderado
Descripción	NP	Descripción	NP	Descripción	NP					
>3%	79	C	59	70% CULTIVOS DE CICLO CORTO / 30% PASTO CULTIVADO	5	23305	75		19,973	3,615
<3%	73	A	47	70% CULTIVOS DE CICLO CORTO / 30% PARAMO	7	24017	36		1,344	0,243
>3%	79	A	47	70% CULTIVOS DE CICLO CORTO / 30% PARAMO	7	25991	41		0,789	0,143
<3%	73	C	59	70% CULTIVOS DE CICLO CORTO / 30% PARAMO	7	30149	61		0,022	0,005
>3%	79	C	59	70% CULTIVOS DE CICLO CORTO / 30% PARAMO	7	32627	67		0,010	0,002
<3%	73	A	47	AFLORAMIENTO ROCOSO, MINA, GRAVA	11	37741	76		0,186	0,045
>3%	79	A	47	AFLORAMIENTO ROCOSO, MINA, GRAVA	11	40843	76		10,180	2,479
<3%	73	B	53	AFLORAMIENTO ROCOSO, MINA, GRAVA	11	42559	85		0,008	0,002
>3%	79	B	53	AFLORAMIENTO ROCOSO, MINA, GRAVA	11	46057	85	74	1,933	0,471
>3%	79	A	47	NIEVE Y HIELO	13	48269	98		0,004	0,001
<3%	73	D	61	AFLORAMIENTO ROCOSO, MINA, GRAVA	11	48983	91		0,025	0,006
<3%	73	A	101	70% CULTIVOS DE CICLO CORTO / 30% PARAMO	7	51611	45		0,041	0,010
>3%	79	D	61	AFLORAMIENTO ROCOSO, MINA, GRAVA	11	53009	91		3,124	0,761
>3%	79	B	53	NIEVE Y HIELO	13	54431	98		0,005	0,001
<3%	73	A	47	PASTO CULTIVADO	17	58327	17		0,132	0,023
>3%	79	D	61	NIEVE Y HIELO	13	62647	98		0,003	0,001
>3%	79	A	47	PASTO CULTIVADO	17	63121	39		0,204	0,036
<3%	73	C	59	PASTO CULTIVADO	17	73219	67		0,514	0,090
<3%	73	B	53	70 % PASTO CULTIVADO / 30% CULTIVOS DE CICLO CORTO	19	73511	43	53	0,232	0,040
<3%	73	A	47	PARAMO	23	78913	29		0,076	0,013
>3%	79	C	59	PASTO CULTIVADO	17	79237	69		0,189	0,033
>3%	79	B	53	70 % PASTO CULTIVADO / 30% CULTIVOS DE CICLO CORTO	19	79553	59		17,051	2,974
<3%	73	C	59	70 % PASTO CULTIVADO / 30% CULTIVOS DE CICLO CORTO	19	81833	70		0,063	0,014
>3%	79	A	47	PARAMO	23	85399	36	66	2,891	0,628
>3%	79	A	101	AFLORAMIENTO ROCOSO, MINA, GRAVA	11	87769	85		7,553	1,641

PENDIENTE		TEXTURA		USO - COBERTURA		NP Producto	CN Asignado	CN II	ÁREA (km^2)	CN II Ponderado
Descripción	NP	Descripción	NP	Descripción	NP					
>3%	79	C	59	70 % PASTO CULTIVADO / 30% CULTIVOS DE CICLO CORTO	19	88559	72		4,350	0,945
<3%	73	B	53	PARAMO	23	88987	44	56	0,122	0,022
>3%	79	B	53	PARAMO	23	96301	52		39,232	7,230
<3%	73	C	59	PARAMO	23	99061	54		0,115	0,021
<3%	73	A	47	70% PARAMO / 30% CULTIVOS DE CICLO CORTO	29	99499	36		0,118	0,022
<3%	73	D	61	PARAMO	23	102419	60		0,019	0,003
>3%	79	A	101	NIEVE Y HIELO	13	103727	98		8,593	1,584
>3%	79	C	59	PARAMO	23	107203	62		88,041	16,225
>3%	79	A	47	70% PARAMO / 30% CULTIVOS DE CICLO CORTO	29	107677	41		4,131	0,761
>3%	79	D	61	PARAMO	23	110837	69	57	3,414	0,640
<3%	73	B	53	70% PARAMO / 30% CULTIVOS DE CICLO CORTO	29	112201	51		0,031	0,006
<3%	73	B	53	70% PARAMO / 30% PASTO CULTIVADO	31	119939	41		0,038	0,007
>3%	79	B	53	70% PARAMO / 30% CULTIVOS DE CICLO CORTO	29	121423	57		0,650	0,122
<3%	73	C	59	70% PARAMO / 30% CULTIVOS DE CICLO CORTO	29	124903	61		0,002	0,000
>3%	79	B	53	70% PARAMO / 30% PASTO CULTIVADO	31	129797	53		2,857	0,536
>3%	79	C	59	70% PARAMO / 30% CULTIVOS DE CICLO CORTO	29	135169	67		3,245	0,609
<3%	73	A	47	AREA URBANA	41	140671	51	56	0,359	0,066
<3%	73	A	47	CUERPO DE AGUA NATURAL	43	147533	100		0,024	0,004
>3%	79	D	61	70% PARAMO / 30% PASTO CULTIVADO	31	149389	71		0,111	0,020
>3%	79	A	47	AREA URBANA	41	152233	54		0,692	0,128
>3%	79	A	47	CUERPO DE AGUA NATURAL	43	159659	100		0,005	0,001
<3%	73	A	101	PARAMO	23	169579	29		0,003	0,001
>3%	79	A	101	PARAMO	23	183517	36		0,850	0,157
<3%	73	A	101	70% PARAMO / 30% PASTO CULTIVADO	31	228563	25		0,006	0,001
>3%	79	A	101	70% PARAMO / 30% PASTO CULTIVADO	31	247349	37		0,695	0,128
<3%	73	A	101	CUERPO DE AGUA NATURAL	43	317039	100	100	1,840	0,606
>3%	79	A	101	CUERPO DE AGUA NATURAL	43	343097	100		0,009	0,003
								TOTAL	**303,86**	**58,76**

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Con el valor del CN II de la cuenca del río Chibunga y los valores de la precipitación media mensual de las estaciones M393 y M394, se aplicó el método del SCS para estimar el valor del caudal medio mensual (TABLA 26)

TABLA 26 Cálculo de caudal por el método SCS

CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)			Condición de humedad	CN	S		Q
		media	máxima	mínima		II	mm	in	m^3/s
M0393	SAN JUAN-CHIMBORAZO	56.57	141.58	5.60	II	58.76	178.29	7.02	2.19
M0394	CAJABAMBA	62.86	131.67	11.99		58.76	178.29	7.02	3.60

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Los valores de los caudales obtenidos mediante el método SCS (TABLA 26) se compararon con los datos hidrológicos del INAMHI (TABLA 24), esto con la finalidad de verificar la relación entre las estaciones meteorológicas y las hidrológicas, teniéndose que los caudales calculados por el método SCS presentan valores del mismo orden que los datos de las estaciones H764 y H785.

b) Caudales en captaciones

En la TABLA 27 se muestran las áreas de las cuencas tomadas como base para el cálculo de los caudales en las captaciones, considerando para esto, que el caudal tiene un porcentaje de excedencia del 70%.

TABLA 27 Estaciones de referencia para el cálculo de caudales.

ESTACIÓN	ÁREA CUENCA (km^2)	COTA	Q 70% (m^3/s)
H-764	102	3440	0.65
H-787	108	3200	4.01

Fuente: INAMHI

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Se realizó la determinación del caudal en el punto de cierre de la cuenca, utilizando las dos estaciones de referencia, H764 y H787. El caudal que mejor representa el comportamiento de la cuenca es el de la estación H764, ya que tiene una elevación similar a la de la cuenca de estudio y tiene una posición similar respecto al Chimborazo. (TABLA 28)

TABLA 28 Cálculo de caudal en estación de cierre H-785, por el método de transposición de caudales

CUENCA	AREA (km^2)	Q (m^3/s) H-764	Q (m^3/s) H-787
H-785	308.55	1.98	11.47

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Se aplicó el método de trasposición de caudales y el método SCS para verificar el caudal en el cierre de la cuenca de estudio, estación H785, (TABLA 29). Se describe el comportamiento hidrológico de la cuenca de una buena forma al aplicar el método de trasposición de caudales con la estación H764 y al aplicar el método SCS con la estación M393, esto considerando el orden de los valores obtenidos y la similitud de las altitudes.

TABLA 29 Comparación de caudales de la cuenca del Río Chibunga.

MÉTODO	Datos INAMHI	Trasposición de caudales		Método SCS	
Nombre de las estaciones	CHIBUNGA EN CALPI **H785**	CALAMACA DJ Q. HUARCUSACHA **H764**	ALAO EN HDA.ALAO **H787**	SAN JUAN-CHIMBORAZO **M0393**	CAJABAMBA **M0394**
Qmedio mensual (m3/s)	1.82	1.98	11.47	2.19	3.60

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Una vez que se pudo comprobar que los métodos aplicados funcionan adecuadamente en la cuenca de estudio (punto de cierre H785), se aplicó el método

de transposición de caudales, descrito en el numeral 3.2.2.4., para obtener los caudales en las captaciones.

Las áreas de aportación de las captaciones se determinaron utilizando la información topográfica de la zona y se muestran en la FIGURA 46.

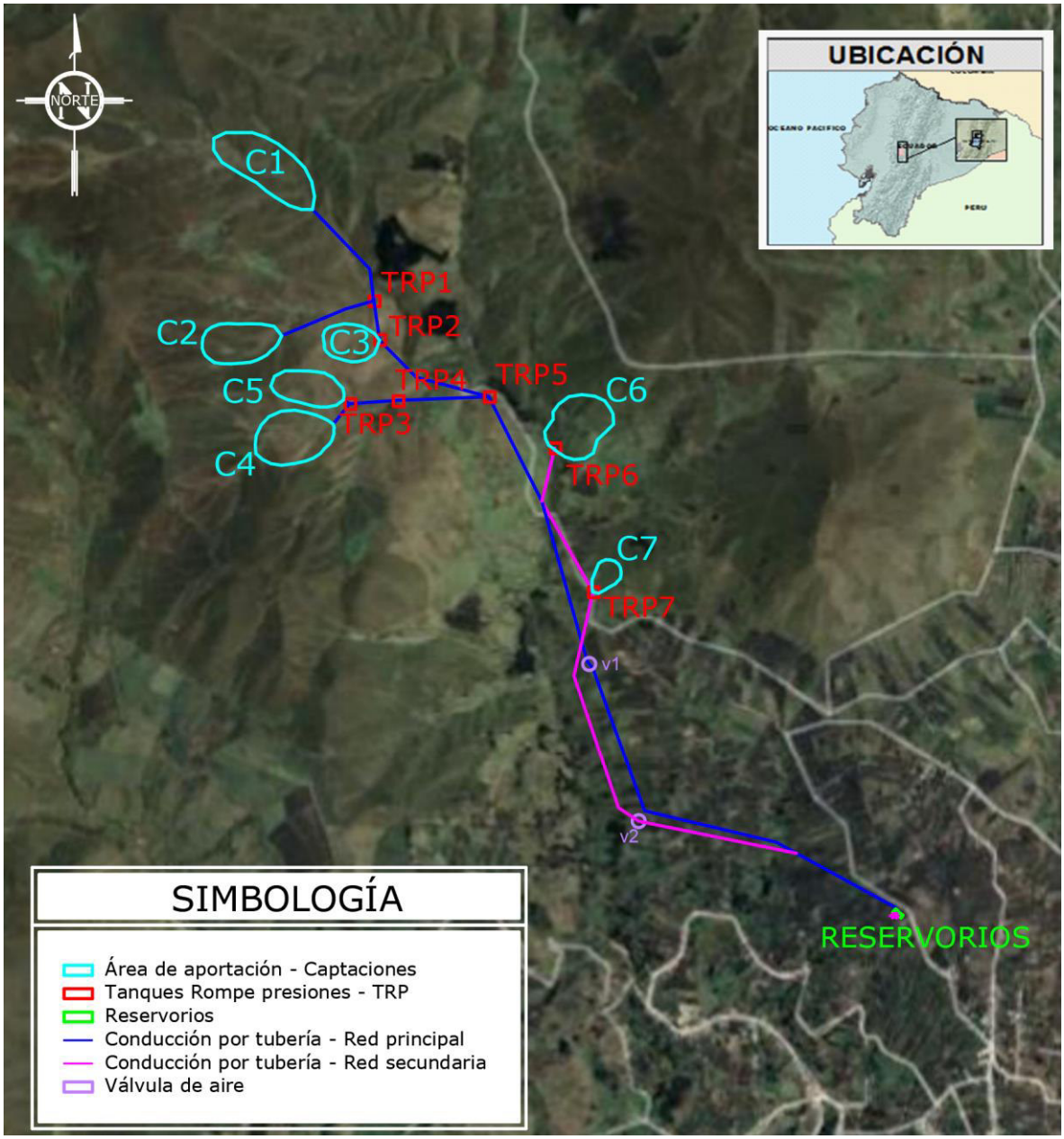


FIGURA 46 Conducción del Sistema de riego.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

El cálculo de los caudales, aplicando el método de transposición de caudales, en cada uno de los puntos de las captaciones (TABLA 30), se realizó teniendo como base la estación H-764 que tiene un área de 102 km^2, y la estación H-787 que tiene un área de 108 km^2.

TABLA 30 Caudales en las captaciones.

CAPTACIÓN	ÁREA (km^2)	COTA (msnm)	Caudales por el método trasposición de caudales		Caudales aforados	
			Q (l/s) H-764	Q (l/s) H-787	Q (l/s) 1era campaña 2do Modelo	Q (l/s) 2da campaña 3er Modelo
1	0.0641	3904	0.41	2.38	2.44	1.91
2	0.0384	3932	0.25	1.43	2.24	1.54
3	0.0246	3837	0.16	0.91	0.73	0.66
4	0.0493	3883	0.32	1.83	2.29	1.88
5	0.0300	3880	0.19	1.11	1.34	1.15
6	0.0466	3769	0.30	1.73	2.29	1.93
7	0.0102	3759	0.07	0.38	0.35	0.32

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Cabe recalcar que el método de trasposición de áreas es aproximado, por lo que depende y es sensible a la delimitación de las microcuencas, por lo que los resultados se validarán con los aforos en estos sitios. Los aforos realizados (TABLA 36) son superiores a los obtenidos con este método para la estación H-764, sin embargo, se ajustan adecuadamente a los obtenidos con la estación H787.

Los resultados asociados a la estación H-787 representan de una mejor manera las condiciones de la cuenca, lo cual puede estar influenciado porque esta estación tiene una altura cercana a la que tienen las captaciones y la cuenca de estudio.

4.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE RIEGO

4.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA CONDUCCIÓN

El sistema de riego cuenta con dos redes, una principal y una secundaria, la red principal está compuesta por 5 captaciones, mientras que la red secundaria está formada por dos captaciones adicionales. Este sistema está comunicado mediante tuberías de PVC desde las captaciones hacia tanques rompepresiones y de estos hasta el reservorio. La ubicación geográfica de las captaciones, así como la de los tanques rompe presiones se detalla en la TABLA 31:

TABLA 31 Ubicación geográfica de las captaciones y tanques rompe presiones.

Elementos	Número del elemento	Coordenadas (WGS 84 – Zona 17S)		
		Cota	Este	Norte
Captación	1	3904.0	741899	9815911
	2	3932.0	741780	9815424
	3	3837.0	742100	9815414
	4	3883.0	741979	9815083
	5	3880.0	741992	9815189
	6	3769.0	742832	9814990
	7	3759.0	743031	9814423
Tanques Rompe Presiones (TRP)	1	3864.0	742208	9815561
	2	3837.0	742100	9815413
	3	3844.7	742044	9815133
	4	3840.0	742227	9815174
	5	3820.0	742629	9815194
	6	3769.0	742832	9814990
	7	3759.0	743031	9814423

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

En la FIGURA 46 se muestra la ubicación de las captaciones, de las dos redes y de los tanques rompe presiones que conforman la conducción de la línea de riego de la comunidad Virgen de las Nieves.

La red de conducción principal es de PVC y se distribuye de la siguiente manera:

De la captación 1 sale una tubería de 2,5” y de la captación 2 una tubería de 2”, las cuales llegan al tanque rompe presión denominado como TRP-1.

FIGURA 47 Captación No. 1 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 48 Vegetación alrededor de la Captación No. 1 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 49 Captación No. 2 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 50 Vegetación alrededor de la Captación No. 2 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 51 Tanque rompe presión TRP-1 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Del tanque rompe presión TRP-1 sale una tubería de 4,0” la cual se conecta con el TRP-2, mismo que también recibe el caudal captado por la captación 3 mediante una tubería de 2”.

FIGURA 52 Captación No. 3 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 53 Tanque rompe presión TRP-2 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Las captaciones 4 y 5 se conectan con el tanque rompe presión TRP-3 a través de dos tuberías de 2,0”.

FIGURA 54 Captación No. 4 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 55 Captación No. 5 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 56 Tanque rompe presión TRP-3 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Del tanque rompe presión TRP-3 sale una tubería de 2” al tanque TRP-4.

FIGURA 57 Tanque rompe presión TRP-4 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Del tanque rompe presión TRP-4 sale una tubería de 2,5” al tanque TRP-5. A este último tanque se conecta una tubería de 4,0” que viene del tanque TRP-2.

FIGURA 58 Tanque rompe presión TRP-5 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Finalmente, la red principal se extiende con una tubería de 4,0” desde el TRP-5 hasta su descarga, en este último tramo existen tres desagües y una válvula de aire.

FIGURA 59 Caja de desagüe CD-1 de la red principal de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 60 Caja de desagüe CD-2 de la red principal de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 61 Caja de desagüe CD-3 de la red principal de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 62 Válvula de aire de la red principal de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Los detalles de la red secundaria son los siguientes:

De la captación 6 se conecta una tubería de 2,0” con el tanque rompe presión TRP-6.

FIGURA 63 Tanque rompe presión TRP-6 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Del tanque rompe presión TRP-6 sale una tubería de 2,0” la cual llega hasta una caja que contiene una válvula de desagüe, a partir de ésta, el diámetro de la tubería es de 2,5” hasta conectarse con el tanque rompe presión de la captación 7, TRP-7.

FIGURA 64 Tanque rompe presión TRP-7 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

El tanque rompe presión de la captación 7 recibe los caudales de esta microcuenca y de la captación 6, de este tanque sale una tubería de 2,5”, misma que se conecta a la red principal. En este tramo final se cuenta con una válvula de aire.

FIGURA 65 Captación No. 7 de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 66 Línea de conducción de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 67 Válvula de aire de la red secundaria de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Al reservorio se llega con una tubería de 6”, misma que es alimentada por la red principal y secundaria, y que concentra los caudales de las 7 captaciones.

FIGURA 68 Tanque reservorio secundario de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 69 Desarenador de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 70 Tanque reservorio principal de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 71 Cámara de unión de tuberías de los reservorios de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN

La distribución tiene un sistema combinado de riego, donde cada usuario tiene asignado dos turnos, diurno y nocturno, una vez cada 7 días, de acuerdo con lo especificado a continuación (TABLA 32):

TABLA 32 Distribución de riego por usuario.

TURNO	TIPO DE RIEGO	FRECUENCIA	RIEGO POR USUARIO	HORARIO	
				LUNES A SÁBADO	DOMINGO
DIURNO	GRAVEDAD	7 DÍAS	2 HORAS	6:00 am a 6:00 pm	6:00 am a 12:00 pm
NOCTURNO	ASPERSIÓN	7 DÍAS	2 HORAS	6:00 pm a 6:00 am	****

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La red de conducción está compuesta por ejes principales de canales abiertos de tierra-cemento que conducen el agua a lo largo de la comunidad, y por canales secundarios de tierra, ubicados transversalmente, que llevan el agua hacia cada una de las parcelas. Además, tiene una red a presión con tubería de PVC que conduce el agua hasta un lote, dividido en parcelas para cada usuario del sistema de riego. En este lote se tiene riego por aspersión, para lo cual, desde una caja principal se distribuye el caudal en varias líneas de aspersores que se controlan mediante válvulas de paso, ubicadas en cajas de control secundarias, distribuidas en el terreno. En total se tienen 78 aspersores distribuidos a las diferentes parcelas (FIGURA 72).

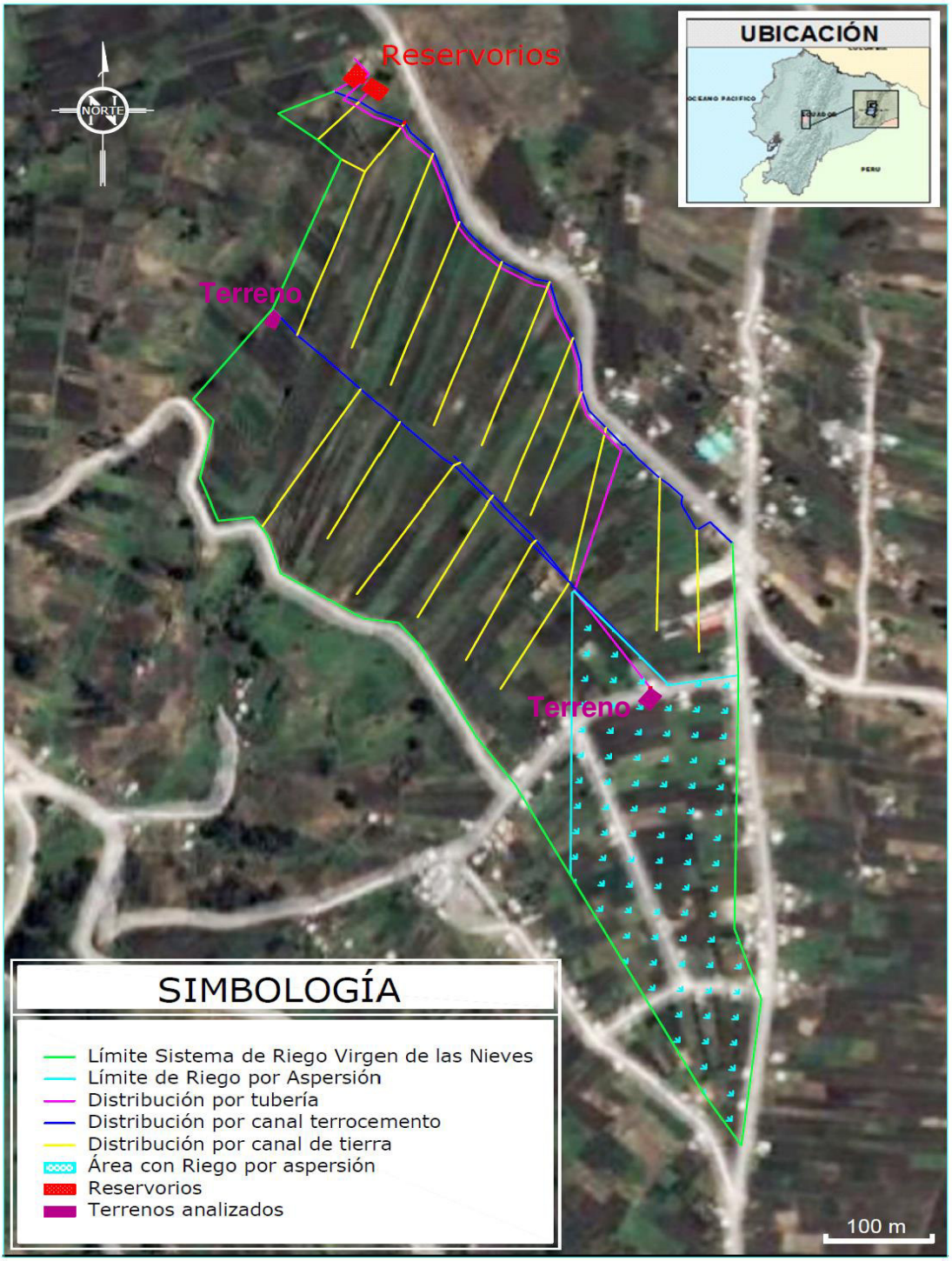


FIGURA 72 Sistema de riego Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 73 Cámara de distribución de caudales de Virgen de las Nieves

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

FIGURA 74 Distribución de Virgen de las Nieves – canal de terrocemento y canal de tierra

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.2.3 MODELACIÓN EN WATERGEMS

4.2.3.1 Condiciones de la red

Para la modelación del sistema de conducción se establecieron los siguientes tramos:

TABLA 33 Tramos del sistema de conducción para modelación en WATERGEMS

Tramo	Punto de partida	Punto de llegada
1	Captación 1 (tubería de 2,5”)	TRP-1
	Captación 2 (tubería de 2,0”)	
2	TRP-1 (tubería de 4,0”)	TRP-2
3	Captación 3 / TRP-2 (tubería de 4,0”)	TRP-5
4	Captación 5 (tubería de 2,0”)	TRP-3
5	Captación 4 (tubería de 2,0”)	
6	TRP-3 (tubería de 2,0”)	TRP-4
7	TRP-4 (tubería de 2,5”)	TRP-5
8	Captación 6 / TRP-6 (tubería de 2,0”)	TRP-7
9	Captación 7 / TRP7 (tubería de 2,5”)	VRC2
	TRP-5 (tubería de 4,0”)	
10	VRC2 (tubería de 6,0”)	Reservorio

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Para que el modelo trabaje conforme las condiciones hidráulicas requeridas, los tramos deben tener las siguientes condiciones de borde, las cuales se ingresaron en el software (TABLA 34)

TABLA 34 Condiciones de la conducción en WATERGEMS

Tramo	Descripción		Datos ingresados al Software		
			1er modelo	2do Modelo	3er Modelo
1 Captación 1 y 2 hacia TRP-1	Elevación reservorio CAPTACIÓN 1	$Cota_{captación\ 1}$	3904	3904	3904
	Elevación reservorio CAPTACIÓN 2	$Cota_{captación\ 2}$	3932	3932	3932

Tramo	Descripción		Datos ingresados al Software		
			1er modelo	2do Modelo	3er Modelo
	Demanda hacia TRP 1 (Captación 1 a nudo J4)	$Q_{captación\ 1}$	2,38	2,44	1,91
	Demanda en VRC-1 hacia TRP1 (Captación 2 a nudo J20)	$Q_{captación\ 2}$	1,43	2,24	1,54
2 TRP-1 hacia TRP-2	Demanda en TRP1 (Nudo J-4 y J-20)	$\sum Q_{captación\ 1} + Q_{captación\ 2}$	3,81	4,68	3,45
	Elevación TRP-1	$Cota_{TRP-1}$	3864	3864	3864
	Tubería de TRP-1 a J-20 (tubería ficticia)	Longitud = 0.01 m *longitud mínima	****	****	****
	Demanda en Nudo J-9 (TRP1 hacia TRP-2)	$\sum Q_{captación\ 1} + Q_{captación\ 2}$	3,81	4,68	3,45
3 Captación 3 / trp-2 hacia TRP-5	Elevación reservorio CAPTACIÓN 3 / TRP-2	$Cota_{captación\ 3/TRP2}$	3837	3837	3837
	Tubería de CAPTACIÓN 3 / TRP-2 a J-21 (tubería ficticia)	Longitud = 0.01 m *longitud mínima	****	****	****
	Demanda en Captación 3 (Captación 3 a nudo J21)	$Q_{captación\ 3}$	0,92	0,73	0,66
	Demanda en Nudo J-7 hacia TRP-5 (Nudo J21 hacia nudo J-7)	$\sum Q_{captación\ 1} + Q_{captación\ 2} + Q_{captación\ 3}$	4,73	5,41	4,11
4 Captación 4 y 5 hacia TRP-3 TRP-3 hacia TRP-4	Elevación reservorio CAPTACIÓN 4	$Cota_{captación\ 4}$	3883	3883	3883
	Demanda hacia TRP 3 (Captación 4 a nudo J24)	$Q_{captación\ 4}$	1,83	2,29	1,88
	Elevación reservorio CAPTACIÓN 5	$Cota_{captación\ 5}$	3880	3880	3880
	Demanda hacia TRP 3 (Captación 5 a nudo J1)	$Q_{captación\ 5}$	1,11	1,34	1,15
	Elevación reservorio TRP-3	$Cota_{TRP3}$	3844,7	3844,7	3844,7
	Presión válvula reductora de presión TRP-4 (TRP3 a Nudo J22)	*0 mca* **para simular las condiciones de un TRP*	****	****	****
	Demanda en TRP-3 (Nudo J1 y J24)	$\sum Q_{captación\ 4} + Q_{captación\ 5}$	2,95	3,62	3,02
	Demanda hacia TRP 3 (TRP-3 hacia nudo J22)	$\sum Q_{captación\ 4} + Q_{captación\ 5}$	2,95	3,62	3,02
5 TRP-4 hacia TRP-5	Elevación reservorio TRP-5	$Cota_{TRP5}$	3820	3820	3820
	Demanda en TRP5 (Nudo J-7 y J-22)	$\sum Q_{captación\ 1} + Q_{captación\ 2} + Q_{captación\ 3} + Q_{captación\ 4} + Q_{captación\ 5}$	7,67	9,03	7,14
6 Captación 6 / TRP-6 hacia TRP-7	Elevación reservorio CAPTACIÓN 6 / TRP-6	$Cota_{captación\ 6/TRP6}$	3769	3769	3769
	Demanda hacia TRP-7 (Captación 6 a nudo J-26)	$Q_{captación\ 6}$	1,73	2,29	1,93

Tramo	Descripción		Datos ingresados al Software		
			1er modelo	2do Modelo	3er Modelo
Captación 7 hacia TRP-7	Elevación reservorio TRP-7	$Cota_{TRP7}$	3759	3759	3759
	Demanda hacia TRP-7 (Captación 7 a nudo J-10)	$Q_{captación\ 7}$	0,38	0,35	0,32
	Demanda en TRP7 (Nudo J-10 y J-26)	$\sum Q_{captación\ 6} + Q_{captación\ 7}$	2,12	2,64	2,26
7 TRP5 y TRP-7 hacia Reservorio y Riego	Elevación Reservorio	$Cota_{Reservorio}$	3738	3738	3738
	Demanda en Nudo J-19 Reservorio (TRP-7 y TRP-5)	$\sum Q_{captación\ 1} + Q_{captación\ 2} + Q_{captación\ 3} + Q_{captación\ 4} + Q_{captación\ 5} + Q_{captación\ 6} + Q_{captación\ 7}$	9,79	11,67	9,39
	Elevación Riego	$Cota_{Riego}$	3704	3704	3704

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Las condiciones para la modelación de la línea de la distribución que llega a los aspersores se muestran en la TABLA 35.

TABLA 35 Condiciones de la red de distribución - aspersores

Condición		Datos ingresados
Elevación reservorio	$Cota_{reservorio}$	3738
Elevación fin de la red	$Cota_{riego}$	3704
Demanda en Nudo final	$\sum Q_{aspersores}$	0.51 l/s (5 aspersores) 6.50 l/s (78 aspersores)

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.2.3.2 Parámetros de la red

El cálculo de las pérdidas del sistema se realizó con el método de Darcy – Weisbach, y se asumió un coeficiente de 0.0015 mm, considerando que el material es PVC (FIGURA 75).

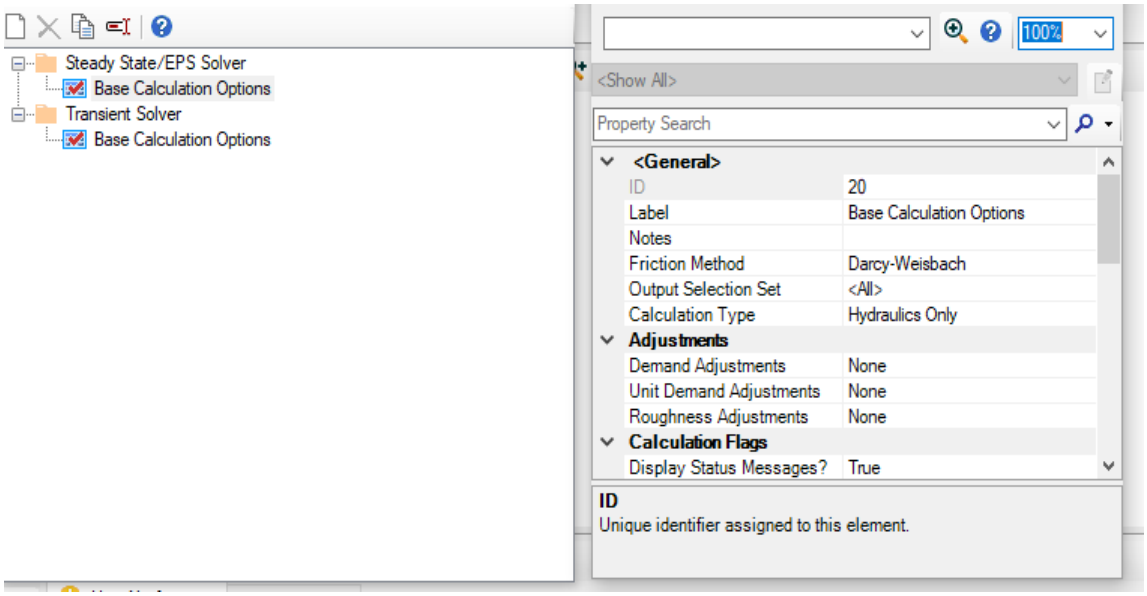


FIGURA 75 Método de cálculo de las perdidas en Wartergems

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

4.2.3.3 Simulaciones

a) Datos de entrada

Se utilizó la información levantada en campo mediante sistemas de posicionamiento global para el trazado de la red y de sus elementos, mismo que fue ingresado en el software (TABLA 31)

Para el primer modelo se utilizaron los valores de caudales de la estación H787 obtenidos en las captaciones por el método de trasposición de caudales (TABLA 30). Para el segundo y tercer modelo se utilizaron los caudales máximos y mínimos aforados, respectivamente (TABLA 36).

TABLA 36 Caudales medidos en las captaciones

Captación	Caudal (l/s)	Caudal (l/s)
	2do modelo	3er modelo
1	2.44	1.91
2	2.24	1.54
3	0.73	0.66

Captación	Caudal (l/s)	Caudal (l/s)
	2do modelo	3er modelo
4	2.29	1.88
5	1.34	1.15
6	2.29	1.93
7	0.35	0.32

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

b) Consideraciones generales

Para la simulación de la red, considerando la existencia de tanques rompe presiones, se modeló cada tramo entre los tanques de la siguiente manera:

- En la FIGURA 76, para las captaciones se utilizó la figura de un reservorio con la cota de la captación y una válvula reguladora de caudal (VRC), a la cual que le asignó el valor de caudal correspondiente a cada captación. Este es un artificio para asignar como constante el caudal en las captaciones.

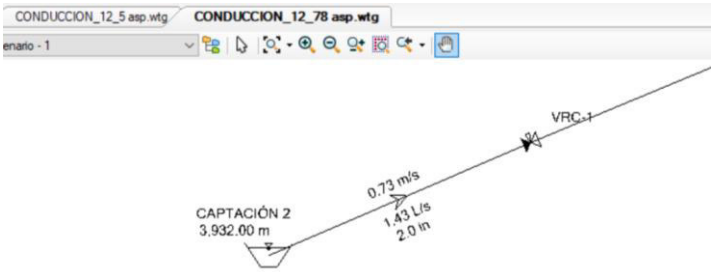


FIGURA 76 Modelación de captaciones en Watergems

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

La red de conducción está conectada mediante tuberías de PVC entre tanques rompe presión (TRP) en los cuales el flujo llega a condiciones atmosféricas. Para representar el funcionamiento real en la modelación, los tramos entre los tanques no están conectados, en la simulación de los TRP se utilizó la figura de un reservorio con la cota de la captación y una válvula reguladora de caudal (VRC), a la cual que se asignó el valor

de caudal correspondiente al flujo de ingreso al tanque (siendo la suma de los provenientes de otra captación o de otro TRP aguas arriba)

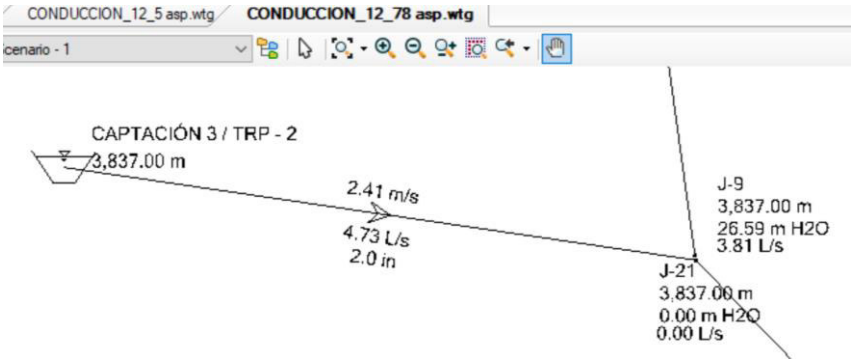


FIGURA 77 Modelación de tanque rompe presiones.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

- Para la simulación de tanques rompe presiones que no reciben caudales adicionales de una captación, se utilizó la figura de una válvula rompe presiones. Asumiendo que la presión es cero para simular que hay un tanque rompe presiones.

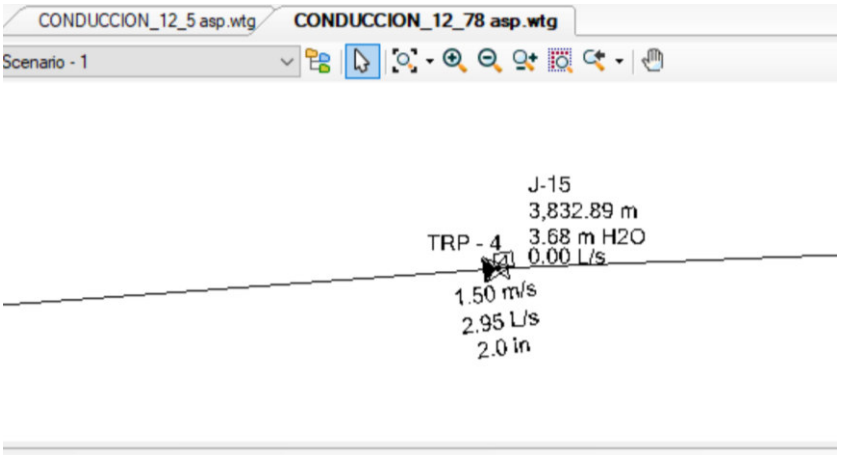


FIGURA 78 Modelación de tanque rompe presiones solo con válvula.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

- Las demandas de caudal para el ingreso al programa, corresponden al caudal o a la suma de caudales en los tramos.

El esquema general del Sistema de Riego Virgen de las Nieves se muestra en la FIGURA 79, donde se especifica un ejemplo con los resultados del primer modelo. El esquema se mantiene en todos los modelos mientras que las condiciones y parámetros de ingreso de estos se detallan en la TABLA 34.

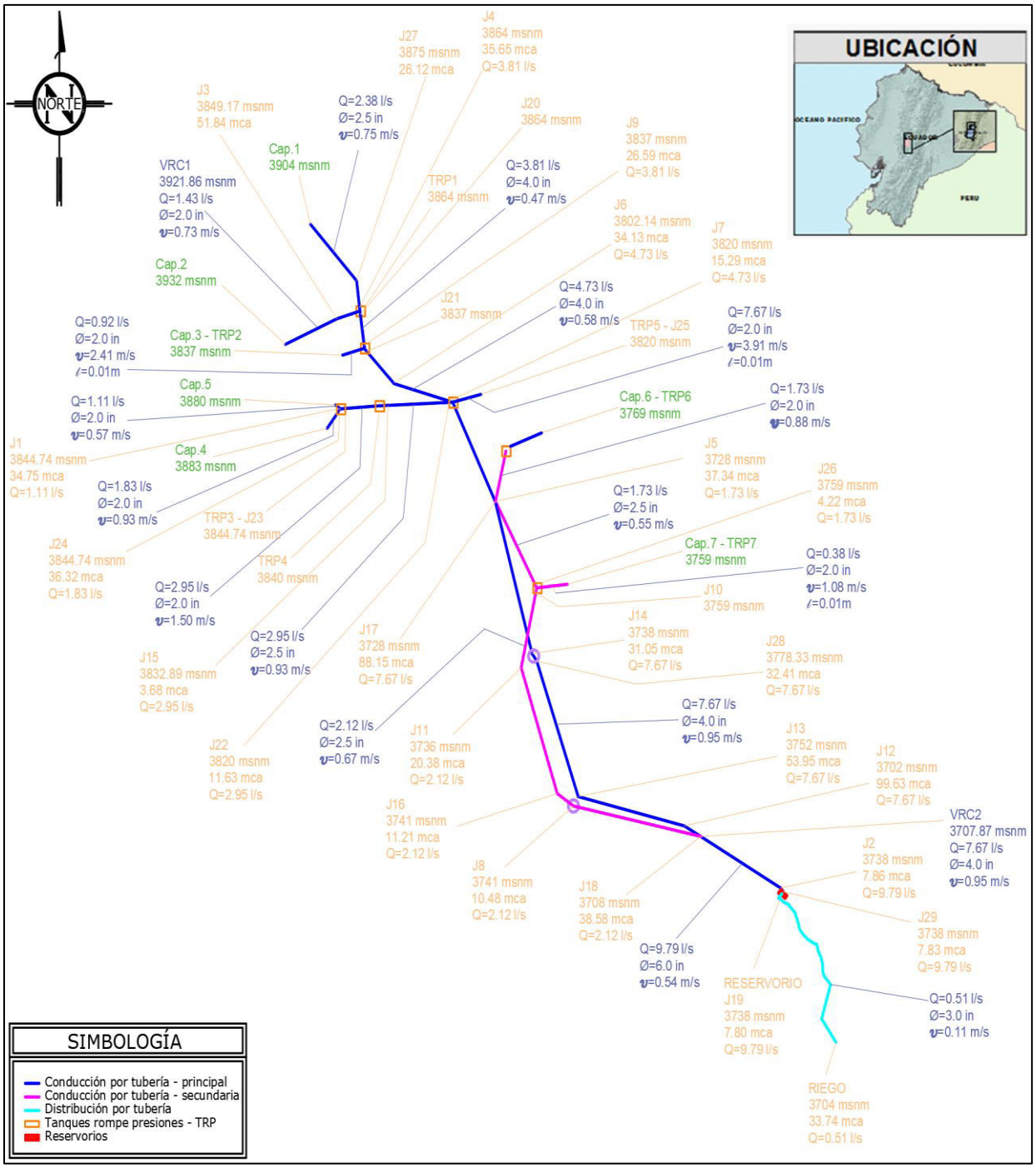


FIGURA 79 Primer modelo en Watergems

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

c) Cálculo de caudales para riego por aspersión y a gravedad

Debido a la situación de emergencia nacional suscitada se escogieron dos parcelas para el análisis, considerando aquellas que se encontraban con turno asignado durante las visitas de campo, teniendo en el primer caso el riego por aspersión y en el segundo caso el riego por gravedad.

Riego por aspersión

Considerando los aparatos existentes en la red de distribución, para la determinación del caudal, se utilizó el aspersor de tipo Xcel Wobbler, distribuido por Plastigama, (Anexo 9 y 10) y se tomaron los valores de consumo para la boquilla de 6 R/M ½", con una presión de 20 PSI y un caudal de 1,10 GPM para el caso de los 78 aspersores. Para el funcionamiento de los 5 aspersores en simultáneo, se tomó una presión de 30 psi y un caudal de 1.35 GPM (TABLA 37).

TABLA 37 Caudales requeridos para riego por aspersión

CONDICIONES DEL SISTEMA		
Descripción	**Reservorio (Inicio de la red)**	**Riego (Fin de la red)**
Elevación (m.s.n.m.)	3738	3704
Presión	34.00	mca
	48.35	psi
ASPERSORES		
Cantidad total	78	
Datos técnicos del aspersor		
Tipo	Xcel Wobbler	
	Boquilla 6 (Gold) R/M 1/2"	
Requerimiento 1		
Presión de trabajo	30	psi
Caudal	1.35	GPM (galones por minuto)
	0.102	l/s
Cantidad en uso	5	
Qtotal	0.511	l/s

Requerimiento 2		
Presión de trabajo	20	psi
Caudal	1.1	GPM (galones por minuto)
	0.083	l/s
Cantidad en uso	78	
Qtotal	6.501	l/s

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Basado en la información recopilada en el sitio, existen 78 aspersores, los cuales están distribuidos inequitativamente para los usuarios del sistema, trabajando simultáneamente con hasta 5 aspersores. Se determinaron los caudales requeridos para el sistema tanto para el funcionamiento de los 78 aspersores como para los 5 aspersores (TABLA 37). Este proceso se realizó para verificar la condición real, así como la más crítica del sistema, teniéndose un caudal total de 0.51 l/s y 6,50 l/s, respectivamente, valores usados para la modelación de la red que sale del reservorio hacia el terreno.

Riego por gravedad

Para la determinación de las condiciones hidráulicas del canal abierto que conduce el agua hacia la parcela que se va a analizar, se utilizó el programa H Canales (Villón, 2003), para lo cual se consideraron los siguientes datos:

TABLA 38 Condiciones de la red de distribución - gravedad

Parámetro	Valores				
Pendiente (m/m)	0.10 (10%)				
Ancho (m)	0,15 - 0,20				
Talud	1 : 0,75				
Coeficiente de Manning	0,033 - Canales sin revestir, (Chow, 1992)				
Caudales (l/s)	Campañas medición	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
	1 era	4.20	3.43	3.10	2.45
	2 da	4.00	3.32	2.95	2.25

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Los aforos se realizaron en diferentes tramos del canal de tierra, siendo el tramo 1 el inicio del canal y el tramo 4 la entrada al terreno a regar (TABLA 38).

4.2.3.4 Resultados de los modelos

a) Primer modelo

El primer modelo se realizó usando los caudales obtenidos con la estación H787 por el método de trasposición de caudales (TABLA 30) y utilizando una demanda de 5 aspersores en la red de distribución. Los resultados muestran un comportamiento similar al obtenido con los caudales mínimos, teniendo una presión en el reservorio de 7.83 mca y en el terreno para riego por aspersión de 33.74 mca. (TABLA 39, TABLA 40).

TABLA 39 Resultados por junta para caudales estimados en captaciones del INAMHI – 5 aspersores

ID	Label	Elevation (m)	Zone	Demand Collection	Demand (L/s)	Hydraulic Grade (m)	Pressure (mca)
176	J-1	3844.74	<None>	<Collection: 1 item>	1.11	3879.56	34.75
179	J-2	3738.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3745.87	7.86
186	J-3	3849.17	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3901.11	51.84
187	J-4	3864.00	<None>	<Collection: 1 item>	3.81	3899.72	35.65
189	J-5	3728.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3765.42	37.34
196	J-6	3802.14	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3836.33	34.13
201	J-7	3820.00	<None>	<Collection: 1 item>	4.73	3835.32	15.29
203	J-8	3741.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3751.51	10.48
211	J-9	3837.00	<None>	<Collection: 1 item>	3.81	3863.64	26.59
214	J-10	3759.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3759.00	0.00
217	J-11	3736.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3756.43	20.38
221	J-12	3702.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3801.83	99.63
224	J-13	3752.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3806.06	53.95
230	J-14	3780.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3811.11	31.05
260	J-15	3832.89	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3836.57	3.68
303	J-16	3741.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3752.23	11.21
310	J-17	3728.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3816.33	88.15
314	J-18	3708.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3746.66	38.58
414	J-19	3738.00	<None>	<Collection: 1 item>	9.79	3745.82	7.80
448	J-20	3864.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3864.00	0.00
456	J-21	3837.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3837.00	0.00
462	J-22	3820.00	<None>	<Collection: 1 item>	2.95	3831.65	11.63
467	J-23	3844.74	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3844.74	0.00
474	J-24	3844.74	<None>	<Collection: 1 item>	1.83	3881.14	36.32
476	J-25	3820.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3820.00	0.00
500	J-26	3759.00	<None>	<Collection: 1 item>	1.73	3763.23	4.22
511	J-27	3875.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3901.17	26.12
533	J-28	3778.33	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3810.81	32.41
543	J-29	3738.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3745.85	7.83
560	Riego	3704.00	<None>	<Collection: 1 item>	0.51	3737.80	33.74

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

TABLA 40 Resultados por tubería para caudales estimados en captaciones del INAMHI – 5 aspersores

Length (Scaled) (m)	Start Node	Stop Node	Diameter (in)	Material	Hazen-Williams C	Flow (L/s)	Velocity (m/s)	Has User Defined Length?	Length (User Defined) (m)	Darcy-Weisbach e (mm)	Headloss (Friction) (m)
521.10	J-13	J-12	4.00	PVC	150.00	7.67	0.95	False	0.000	0.0015	0.008
296.84	J-6	J-7	4.00	PVC	150.00	4.73	0.58	False	0.000	0.0015	0.003
34.05	CAPTACIÓN 2	VRC-1	2.00	PVC	150.00	1.43	0.73	False	0.000	0.0015	0.012
93.29	J-16	J-8	2.50	PVC	150.00	2.12	0.67	False	0.000	0.0015	0.008
642.02	J-17	J-14	4.00	PVC	150.00	7.67	0.95	False	0.000	0.0015	0.008
231.99	VRC-1	J-3	2.00	PVC	150.00	1.43	0.73	False	0.000	0.0015	0.012
114.68	J-3	J-4	2.00	PVC	150.00	1.43	0.73	False	0.000	0.0015	0.012
153.79	J-20	J-9	4.00	PVC	150.00	3.81	0.47	False	0.000	0.0015	0.002
194.05	J-21	J-6	4.00	PVC	150.00	4.73	0.58	False	0.000	0.0015	0.003
351.39	J-15	J-22	2.50	PVC	150.00	2.95	0.93	False	0.000	0.0015	0.014
0.32	TRP - 4	J-15	2.00	PVC	150.00	2.95	1.5	True	0.010	0.0015	0.060
185.30	J-23	TRP - 4	2.00	PVC	150.00	2.95	1.5	False	0.000	0.0015	0.044
451.01	J-25	J-17	4.00	PVC	150.00	7.67	0.95	False	0.000	0.0015	0.008
330.77	J-10	J-11	2.50	PVC	150.00	2.12	0.67	False	0.000	0.0015	0.008
538.83	J-11	J-16	2.50	PVC	150.00	2.12	0.67	False	0.000	0.0015	0.008
402.51	J-5	J-26	2.50	PVC	150.00	1.73	0.55	False	0.000	0.0015	0.005
210.65	CAPTACIÓN 6 / TRP - 6	J-5	2.00	PVC	150.00	1.73	0.88	False	0.000	0.0015	0.017
296.18	CAPTACIÓN 1	J-27	2.50	PVC	150.00	2.38	0.75	False	0.000	0.0015	0.010
151.48	J-27	J-4	2.50	PVC	150.00	2.38	0.75	False	0.000	0.0015	0.010
89.80	J-12	VRC-2	4.00	PVC	150.00	7.67	0.95	False	0.000	0.0015	0.008
1.93	VRC-2	J-18	4.00	PVC	150.00	7.67	0.95	False	0.000	0.0015	0.008
37.00	J-14	J-28	4.00	PVC	150.00	7.67	0.95	False	0.000	0.0015	0.008
584.21	J-28	J-13	4.00	PVC	150.00	7.67	0.95	False	0.000	0.0015	0.008
14.05	J-2	J-29	6.00	PVC	150.00	9.79	0.54	False	0.000	0.0015	0.002
18.10	J-29	J-19	6.00	PVC	150.00	9.79	0.54	False	0.000	0.0015	0.002
50.93	TRP - 5	J-25	2.00	PVC	150.00	7.67	3.91	True	0.010	0.0015	0.238
52.79	CAPTACIÓN 7 / TRP - 7	J-10	2.00	PVC	150.00	2.12	1.08	True	0.010	0.0015	0.030
434.56	J-18	J-2	6.00	PVC	150.00	9.79	0.54	False	0.000	0.0015	0.002
622.99	J-8	J-18	2.50	PVC	150.00	2.12	0.67	False	0.000	0.0015	0.008
72.72	TRP - 1	J-20	2.00	PVC	150.00	3.81	1.94	True	0.010	0.0015	0.060
57.13	CAPTACIÓN 3 / TRP - 2	J-21	2.00	PVC	150.00	4.73	2.41	True	0.010	0.0015	0.089
27.19	TRP - 3	J-23	2.00	PVC	150.00	2.95	1.5	True	0.010	0.0015	0.030
99.19	CAPTACIÓN 4	J-24	2.00	PVC	150.00	1.83	0.93	False	0.000	0.0015	0.019
56.80	CAPTACIÓN 5	J-1	2.00	PVC	150.00	1.11	0.57	False	0.000	0.0015	0.008
722.11	Reservorio	Riego	3.00	PVC	150.00	0.51	0.11	False	0.000	0.0015	0.000

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

b) Segundo modelo

Los resultados del segundo modelo considerando los valores de caudal máximo para el sistema de riego con el uso simultáneo de 5 aspersores (TABLA 41, TABLA 42). Se evidencia que no existen problemas de presiones negativas en los nudos, además, se presentan velocidades bajas menores a 0.7 m/s, lo que puede producir

sedimentación en la sección final antes del reservorio. En el punto de llegada del riego por aspersión se tiene una columna de agua de alrededor de 34 mca y en la llegada al reservorio 1.62 mca.

TABLA 41 Resultados por junta para primera campaña de aforos – 5 aspersores

ID	Label	Elevation (m)	Zone	Demand Collection	Demand (L/s)	Hydraulic Grade (m)	Pressure (mca)
176	J-1	3844.74	<None>	<Collection: 1 item>	1.34	3879.39	34.57
179	J-2	3738.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3739.70	1.70
186	J-3	3849.17	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3902.62	53.34
187	J-4	3864.00	<None>	<Collection: 1 item>	4.68	3899.53	35.46
189	J-5	3728.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3763.10	35.03
196	J-6	3802.14	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3836.15	33.95
201	J-7	3820.00	<None>	<Collection: 1 item>	5.41	3834.86	14.83
203	J-8	3741.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3747.93	6.92
211	J-9	3837.00	<None>	<Collection: 1 item>	4.68	3863.48	26.43
214	J-10	3759.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3759.00	0.00
217	J-11	3736.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3755.20	19.16
221	J-12	3702.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3795.59	93.40
224	J-13	3752.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3801.28	49.18
230	J-14	3780.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3808.06	28.00
260	J-15	3832.89	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3832.89	0.00
303	J-16	3741.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3749.01	7.99
310	J-17	3728.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3815.07	86.90
314	J-18	3708.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3740.77	32.71
414	J-19	3738.00	<None>	<Collection: 1 item>	11.68	3739.62	1.62
448	J-20	3864.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3864.00	0.00
456	J-21	3837.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3837.00	0.00
462	J-22	3820.00	<None>	<Collection: 1 item>	3.63	3825.77	5.75
467	J-23	3844.74	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3844.74	0.00
474	J-24	3844.74	<None>	<Collection: 1 item>	2.29	3880.22	35.41
476	J-25	3820.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3820.00	0.00
500	J-26	3759.00	<None>	<Collection: 1 item>	2.29	3759.51	0.51
511	J-27	3875.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3901.04	25.99
533	J-28	3778.33	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3807.66	29.27
543	J-29	3738.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3739.67	1.66
560	Riego	3704.00	<None>	<Collection: 1 item>	0.51	3737.80	33.74

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

TABLA 42 Resultados por tubería para primera campaña de aforos – 5 aspersores

Length (Scaled) (m)	Start Node	Stop Node	Diameter (in)	Material	Hazen-Williams C	Flow (L/s)	Velocity (m/s)	Has User Defined Length?	Length (User Defined) (m)	Darcy-Weisbache (mm)	Headloss (Friction) (m)
521.10	J-13	J-12	4.00	PVC	150.00	9.04	1.12	False	0.000	0.0015	0.011
296.84	J-6	J-7	4.00	PVC	150.00	5.41	0.67	False	0.000	0.0015	0.004
34.05	CAPTACIÓN 2	VRC-1	2.00	PVC	150.00	2.24	1.14	False	0.000	0.0015	0.027
93.29	J-16	J-8	2.50	PVC	150.00	2.64	0.83	False	0.000	0.0015	0.011
642.02	J-17	J-14	4.00	PVC	150.00	9.04	1.12	False	0.000	0.0015	0.011
231.99	VRC-1	J-3	2.00	PVC	150.00	2.24	1.14	False	0.000	0.0015	0.027
114.68	J-3	J-4	2.00	PVC	150.00	2.24	1.14	False	0.000	0.0015	0.027
153.79	J-20	J-9	4.00	PVC	150.00	4.68	0.58	False	0.000	0.0015	0.003
194.05	J-21	J-6	4.00	PVC	150.00	5.41	0.67	False	0.000	0.0015	0.004
351.39	J-15	J-22	2.50	PVC	150.00	3.63	1.15	False	0.000	0.0015	0.020
0.32	TRP - 4	J-15	2.00	PVC	150.00	3.63	1.85	True	0.010	0.0015	0.060
185.30	J-23	TRP - 4	2.00	PVC	150.00	3.63	1.85	False	0.000	0.0015	0.064
451.01	J-25	J-17	4.00	PVC	150.00	9.04	1.12	False	0.000	0.0015	0.011
330.77	J-10	J-11	2.50	PVC	150.00	2.64	0.83	False	0.000	0.0015	0.011
538.83	J-11	J-16	2.50	PVC	150.00	2.64	0.83	False	0.000	0.0015	0.011
402.51	J-5	J-26	2.50	PVC	150.00	2.29	0.72	False	0.000	0.0015	0.009
210.65	CAPTACIÓN 6 / TRP - 6	J-5	2.00	PVC	150.00	2.29	1.17	False	0.000	0.0015	0.028
296.18	CAPTACIÓN 1	J-27	2.50	PVC	150.00	2.44	0.77	False	0.000	0.0015	0.010
151.48	J-27	J-4	2.50	PVC	150.00	2.44	0.77	False	0.000	0.0015	0.010
89.80	J-12	VRC-2	4.00	PVC	150.00	9.04	1.12	False	0.000	0.0015	0.011
1.93	VRC-2	J-18	4.00	PVC	150.00	9.04	1.12	False	0.000	0.0015	0.011
37.00	J-14	J-28	4.00	PVC	150.00	9.04	1.12	False	0.000	0.0015	0.011
584.21	J-28	J-13	4.00	PVC	150.00	9.04	1.12	False	0.000	0.0015	0.011
14.05	J-2	J-29	6.00	PVC	150.00	11.68	0.64	False	0.000	0.0015	0.002
18.10	J-29	J-19	6.00	PVC	150.00	11.68	0.64	False	0.000	0.0015	0.002
50.93	TRP - 5	J-25	2.00	PVC	150.00	9.04	4.60	True	0.010	0.0015	0.327
52.79	CAPTACIÓN 7 / TRP - 7	J-10	2.00	PVC	150.00	2.64	1.34	True	0.010	0.0015	0.030
434.56	J-18	J-2	6.00	PVC	150.00	11.68	0.64	False	0.000	0.0015	0.002
622.99	J-8	J-18	2.50	PVC	150.00	2.64	0.83	False	0.000	0.0015	0.011
72.72	TRP - 1	J-20	2.00	PVC	150.00	4.68	2.38	True	0.010	0.0015	0.089
57.13	CAPTACIÓN 3 / TRP - 2	J-21	2.00	PVC	150.00	5.41	2.76	True	0.010	0.0015	0.119
27.19	TRP - 3	J-23	2.00	PVC	150.00	3.63	1.85	True	0.010	0.0015	0.060
99.19	CAPTACIÓN 4	J-24	2.00	PVC	150.00	2.29	1.17	False	0.000	0.0015	0.028
56.80	CAPTACIÓN 5	J-1	2.00	PVC	150.00	1.34	0.68	False	0.000	0.0015	0.011
722.11	Reservorio	Riego	3.00	PVC	150.00	0.51	0.11	False	0.000	0.0015	0.000

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

c) Tercer modelo

El modelo con los datos de caudales mínimos aforados y con una demanda para trabajar en simultáneo con 5 aspersores, presenta un buen comportamiento, ya que no existen presiones negativas, el menor valor de presiones que maneja es de 2.99

mca, el cual se presenta en el nudo J-26. Los resultados de los nudos se muestran en la TABLA 43.

Los resultados de las tuberías se muestran en la TABLA 44 y se evidencia que se presentan velocidades mínimas de 0.11 m/s en el tramo entre el reservorio y la zona de riego. El flujo llega con una presión de 6.49 mca en el reservorio y 33.74 mca en la zona de riego por aspersión.

TABLA 43 Resultados por junta para segunda campaña de aforos – 5 aspersores

ID	Label	Elevation (m)	Zone	Demand Collection	Demand (L/s)	Hydraulic Grade (m)	Pressure (mca)
176	J-1	3844.74	<None>	<Collection: 1 item>	1.15	3879.53	34.72
179	J-2	3738.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3744.56	6.54
186	J-3	3849.17	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3902.69	53.42
187	J-4	3864.00	<None>	<Collection: 1 item>	3.45	3901.10	37.03
189	J-5	3728.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3764.65	36.58
196	J-6	3802.14	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3836.48	34.28
201	J-7	3820.00	<None>	<Collection: 1 item>	4.11	3835.69	15.66
203	J-8	3741.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3750.67	9.65
211	J-9	3837.00	<None>	<Collection: 1 item>	3.45	3863.70	26.64
214	J-10	3759.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3759.00	0.00
217	J-11	3736.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3756.14	20.10
221	J-12	3702.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3804.02	101.81
224	J-13	3752.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3807.74	55.63
230	J-14	3780.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3812.18	32.12
260	J-15	3836.22	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3836.22	0.00
303	J-16	3741.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3751.48	10.46
310	J-17	3728.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3816.77	88.59
314	J-18	3708.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3745.28	37.21
414	J-19	3738.00	<None>	<Collection: 1 item>	9.39	3744.50	6.49
448	J-20	3864.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3864.00	0.00
456	J-21	3837.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3837.00	0.00
462	J-22	3820.00	<None>	<Collection: 1 item>	3.02	3831.09	11.07
467	J-23	3844.74	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3844.74	0.00
474	J-24	3844.74	<None>	<Collection: 1 item>	1.88	3881.04	36.23
476	J-25	3820.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3820.00	0.00
500	J-26	3759.00	<None>	<Collection: 1 item>	1.93	3762.00	2.99
511	J-27	3875.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3902.08	27.03
533	J-28	3778.33	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3811.92	33.52
543	J-29	3738.00	<None>	<Collection: 0 items>	0.00	3744.53	6.52
560	Riego	3704.00	<None>	<Collection: 1 item>	0.51	3737.80	33.74

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

TABLA 44 Resultados por tubería para segunda campaña de aforos – 5 aspersores

Length (Scaled) (m)	Start Node	Stop Node	Diameter (in)	Material	Hazen-Williams C	Flow (L/s)	Velocity (m/s)	Has User Defined Length?	Length (User Defined) (m)	Darcy-Weisbach e (mm)	Headloss (Friction) (m)
521.10	J-13	J-12	4.00	PVC	150.00	7.14	0.88	False	0.000	0.0015	0.007
296.84	J-6	J-7	4.00	PVC	150.00	4.11	0.51	False	0.000	0.0015	0.003
34.05	CAPTACIÓN 2	VRC-1	2.00	PVC	150.00	1.54	0.78	False	0.000	0.0015	0.014
93.29	J-16	J-8	2.50	PVC	150.00	2.25	0.71	False	0.000	0.0015	0.009
642.02	J-17	J-14	4.00	PVC	150.00	7.14	0.88	False	0.000	0.0015	0.007
231.99	VRC-1	J-3	2.00	PVC	150.00	1.54	0.78	False	0.000	0.0015	0.014
114.68	J-3	J-4	2.00	PVC	150.00	1.54	0.78	False	0.000	0.0015	0.014
153.79	J-20	J-9	4.00	PVC	150.00	3.45	0.43	False	0.000	0.0015	0.002
194.05	J-21	J-6	4.00	PVC	150.00	4.11	0.51	False	0.000	0.0015	0.003
351.39	J-15	J-22	2.50	PVC	150.00	3.02	0.95	False	0.000	0.0015	0.015
0.32	TRP - 4	J-15	2.00	PVC	150.00	3.02	1.54	True	0.010	0.0015	0.060
185.30	J-23	TRP - 4	2.00	PVC	150.00	3.02	1.54	False	0.000	0.0015	0.046
451.01	J-25	J-17	4.00	PVC	150.00	7.14	0.88	False	0.000	0.0015	0.007
330.77	J-10	J-11	2.50	PVC	150.00	2.25	0.71	False	0.000	0.0015	0.009
538.83	J-11	J-16	2.50	PVC	150.00	2.25	0.71	False	0.000	0.0015	0.009
402.51	J-5	J-26	2.50	PVC	150.00	1.93	0.61	False	0.000	0.0015	0.007
210.65	CAPTACIÓN 6 / TRP - 6	J-5	2.00	PVC	150.00	1.93	0.98	False	0.000	0.0015	0.021
296.18	CAPTACIÓN 1	J-27	2.50	PVC	150.00	1.91	0.60	False	0.000	0.0015	0.006
151.48	J-27	J-4	2.50	PVC	150.00	1.91	0.60	False	0.000	0.0015	0.006
89.80	J-12	VRC-2	4.00	PVC	150.00	7.14	0.88	False	0.000	0.0015	0.007
1.93	VRC-2	J-18	4.00	PVC	150.00	7.14	0.88	False	0.000	0.0015	0.007
37.00	J-14	J-28	4.00	PVC	150.00	7.14	0.88	False	0.000	0.0015	0.007
584.21	J-28	J-13	4.00	PVC	150.00	7.14	0.88	False	0.000	0.0015	0.007
14.05	J-2	J-29	6.00	PVC	150.00	9.39	0.51	False	0.000	0.0015	0.002
18.10	J-29	J-19	6.00	PVC	150.00	9.39	0.51	False	0.000	0.0015	0.002
50.93	TRP - 5	J-25	2.00	PVC	150.00	7.14	3.64	True	0.010	0.0015	0.208
52.79	CAPTACIÓN 7 / TRP - 7	J-10	2.00	PVC	150.00	2.25	1.15	True	0.010	0.0015	0.030
434.56	J-18	J-2	6.00	PVC	150.00	9.39	0.51	False	0.000	0.0015	0.002
622.99	J-8	J-18	2.50	PVC	150.00	2.25	0.71	False	0.000	0.0015	0.009
72.72	TRP - 1	J-20	2.00	PVC	150.00	3.45	1.76	True	0.010	0.0015	0.060
57.13	CAPTACIÓN 3 / TRP - 2	J-21	2.00	PVC	150.00	4.11	2.09	True	0.010	0.0015	0.089
27.19	TRP - 3	J-23	2.00	PVC	150.00	3.02	1.54	True	0.010	0.0015	0.060
99.19	CAPTACIÓN 4	J-24	2.00	PVC	150.00	1.88	0.96	False	0.000	0.0015	0.020
56.80	CAPTACIÓN 5	J-1	2.00	PVC	150.00	1.15	0.59	False	0.000	0.0015	0.008
722.11	Reservorio	Riego	3.00	PVC	150.00	0.51	0.11	False	0.000	0.0015	0.000

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Los resultados de los tres modelos considerando el uso de 78 aspersores (Anexo 11), presentan las siguientes observaciones:

- En la conducción no existen presiones negativas, sin embargo, se evidencian presiones bajas las cuales pueden ser explicadas debido al sifón que se

encuentra en el desagüe final (3702 msnm). Este desagüe recibe caudal de la red secundaria, desde el punto más bajo la cota de la conducción sigue elevándose hasta llegar al reservorio (3738 msnm), esta característica responde a la topografía de la zona.

- Para la red de distribución modelada, para el riego por aspersión, no existen presiones negativas ni problemas de velocidad; sin embargo, el caudal se basa en estimaciones del consumo de los aspersores.

  Además, se realizaron los modelos modificando la demanda, de forma que se considere el valor crítico de consumo, de 6.5 l/s, que implica el funcionamiento de 78 aspersores simultáneamente. Después de analizar los resultados de la modelación para los modelos de la conducción, se evidencia que el sistema está trabajando al máximo de su capacidad, lo que produce pérdidas por fricción considerables.
- Para el caso del canal de distribución del riego a gravedad, los calados varían entre 2 y 3 cm, en régimen supercrítico; sin embargo, se debe considerar que por no ser revestidos hay pérdidas por infiltración que no se consideran, pese a esto, los aforos mostrados en los diferentes tramos del canal evidencian una pérdida de caudal del 42% en un tramo de 234 m de recorrido (Anexo 12).

4.3 REQUERIMIENTOS DE AGUA DE LOS CULTIVOS

4.3.1 DOTACIÓN DE AGUA EN LOS CULTIVOS DEL SISTEMA ACTUAL

Debido a las condiciones de la emergencia nacional no fue posible realizar varias campañas de aforos en los diferentes terrenos y con la rotación de diferentes tipos de cultivos, por lo que se consideró el lote que se encontraba en turno durante la segunda campaña de toma de datos de aforos.

Mediante la campaña de aforos realizada en el Sistema de riego Virgen de Las Nieves, dentro de los turnos diurnos a gravedad, con una frecuencia de dos horas cada 7 días, a una parcela de 100 m^2, con cultivo de papas, se obtuvieron los siguientes datos:

TABLA 45 Medición de caudales en el predio de turno.

Q1	2.36 l/s
Q2	2.25 l/s
Q3	2.75 l/s
Qpromedio	**2.45 l/s**

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Cabe recalcar que, en la Comunidad Virgen de las Nieves, los turnos de riego a gravedad y de aspersión se asignan al usuario, independientemente del número de terrenos que posea, tipo de cultivo, superficie y ubicación del terreno, además, el caudal es variable desde el tanque hasta el terreno de turno, por las pérdidas de infiltración provocadas por el tipo de material de los canales de distribución y la longitud de recorrido.

4.3.2 REQUERIMIENTO DE AGUA DE LOS CULTIVOS MEDIANTE CROPWAT.

Los resultados de requerimientos de agua (TABLA 46) se han podido establecer según el tipo de cultivo, considerando un suelo franco arcilloso y periodos de siembra recomendados por la FAO y basado en la precipitación de la zona cuyos valores se muestran en la TABLA 15. El proceso de cálculo en el software se muestra en el Anexo 13.

TABLA 46 Resultados de los RAC del estudio, mediante CROPWAT

Tipo de cultivo	Etapa total del crecimiento del cultivo (días)	Suelo	Requerimiento de agua de riego (mm/dec)
Zanahoria	150	Franco Arcilloso	187.7
Cebolla	70	Franco Arcilloso	71.4
Papa	130	Franco Arcilloso	126
Pasto de Pastoreo	60	Franco Arcilloso	24.4

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

*(mm/dec) = milímetros /10 días

4.3.3 ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA VS EL REQUERIMIENTO DE AGUA PARA LOS CULTIVOS

De acuerdo a la información recolectada in-situ, el turno diurno a gravedad tiene una duración de dos horas con una frecuencia cada siete días. Se analizó un terreno de 100 m^2 con un cultivo de papas, el cual tiene un caudal de ingreso de 2.4 l/s.

Se transformó el caudal de ingreso mantenido durante las 2 horas del turno, obteniéndose un volumen de 17.28 m^3; este volumen distribuido en el terreno de estudio de 100 m^2 implica una disponibilidad de 172 mm de agua en cada turno. Mientras que, según el cálculo de requerimiento de agua en el Cropwat con las características climáticas del sector, de suelo y específicamente para el cultivo de papas, se requiere de 88.2 mm de agua cada 7 días, dejando un excedente de agua de 83.8 mm. Los cálculos se encuentran detallados en la TABLA 47.

TABLA 47 Disponibilidad de agua VS Requerimiento de Agua, en el caso de estudio

Requerimiento de agua para papas mediante Cropwat				
(mm/dec)	*(mmm/7 días)*			
126	88.2			
* mm/dec = milímetros / 10 días				
Disponibilidad de agua en el turno de estudio				
(l/s)	*(m^3/s)*	*duración del turno (2h)*	*en el terreno de turno (100 m^2)*	*en 1 turno cada 7 días*
		(m3)	*(m)*	*(mm)*
2.4	0.0024	17.28	0.17	172
Cálculo de requerimiento del cultivo de papas en el turno de estudio				
en 1 turno cada 7 días	*en el terreno de turno (100 m^2)*	*duración del turno (2h)*	*(m^3/s)*	*(l/s)*
(mm)	*(m)*	*(m^3)*		
88.2	0.0882	8.82	0.00122	1.2

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

Comparando la cantidad de agua disponible y el requerimiento, según el caso de estudio, se tiene que existe un exceso de dotación de agua de un 50%.

4.4 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VIRGEN DE LAS NIEVES

En el sistema de riego actual, el tramo de la conducción se encuentra operativo tanto para condiciones en las que se producen caudales mínimos como caudales máximos en las captaciones. Además, cumplen con las presiones mínimas, velocidades en tuberías y permiten la llegada de agua a los tanques de reserva.

Dentro del plan de optimización, se determinaron requerimientos de agua de acuerdo a los cultivos más representativos de la cuenca y ajustados a las características climáticas y de suelo, de manera que sean considerados para la dotación correcta en cada turno (TABLA 46). En la línea de distribución de riego por gravedad, se propone un mantenimiento a los canales para evitar las pérdidas de infiltración que representan alrededor del 42% hasta la entrega del recurso en la parcela de turno, considerando el recorrido de 234 m.

Los resultados mencionados, permiten considerar la posibilidad de realizar una reasignación de turnos en el sistema de distribución de agua por aspersión, con un caudal fijo, según el máximo requerimiento de agua, para el cultivo predominante del área a regar. El asignar varias líneas de riego simultáneamente es posible, ya que el modelo mostró que se puede abastecer a los 78 aspersores simultáneamente (TABLA 11. 1, TABLA 11. 2, TABLA 11. 3, TABLA 11. 4 del Anexo 11). Sin embargo, se debería considerar la aplicación de los actuales turnos nocturnos, de forma que el caudal excedente permita llenar el reservorio 2.

Por lo que se propone implementar una nueva línea de distribución por aspersión para que funcione en el turno diurno en conjunto con el riego por gravedad. Esta nueva línea de aspersión se instalaría en la zona más alejada, respecto del reservorio, dentro del límite de la comunidad. Esto permitirá que se pueda disponer de mayor recurso hídrico, para la ampliación del área regada para más usuarios, con la finalidad de evitar las pérdidas de infiltración, optimizar el riego tecnificado y simultaneo para varios usuarios. La nueva red podría estar compuesta de hasta 30 aspersores, (TABLA 11. 9, TABLA 11. 10) lo que permite utilizar el caudal

disponible (3.21 l/s) luego de usar el recurso hídrico para el riego a gravedad. (TABLA 48)

TABLA 48 Propuesta de implementación de línea de aspersores

Volumen (m3)	Reservorio 1	243.64
	Reservorio 2	436.92
	Total	680.56
Caudal aforado en reservorio (l/s)	1era campaña	9.75
	2da campaña	7.41
Caudal aforado requerido (l/s)	Q canal turno diurno	4.20
Caudal disponible para nueva red (l/s)	Q aspersores para turno diurno	3.21
Propuesta de red de aspersores en turno diurno		
Número de aspersores	30	
Qtotal	3.069	l/s

4.5 SITUACIÓN LEGAL DE LA CUENCA

Uno de los temas más importantes respecto al consumo de agua para riego en los sectores rurales es la necesidad de contar con una concesión que se encuentre legalizada y actualizada por el ente rector, que actualmente es el Ministerio del Ambiente y del Agua (SENAGUA).

Las concesiones vigentes dentro del área de interés de la Cuenca del Chibunga se pueden observar en la FIGURA 80, las mismas pertenecen a la Demarcación Hidrográfica de Pastaza y corresponden a usuarios particulares y seccionales, entre estos se encuentran: agrupaciones de usuarios de distinta índole, asociaciones varias, inmobiliarias, cabildos, centros o institucionales educativas, cooperativas de distinta naturaleza, directorios de agua, instituciones religiosas, juntas administradoras de agua potable, juntas de aguas, municipios, concejos y personas naturales. Esta base de datos ha sido obtenida de la SENAGUA.

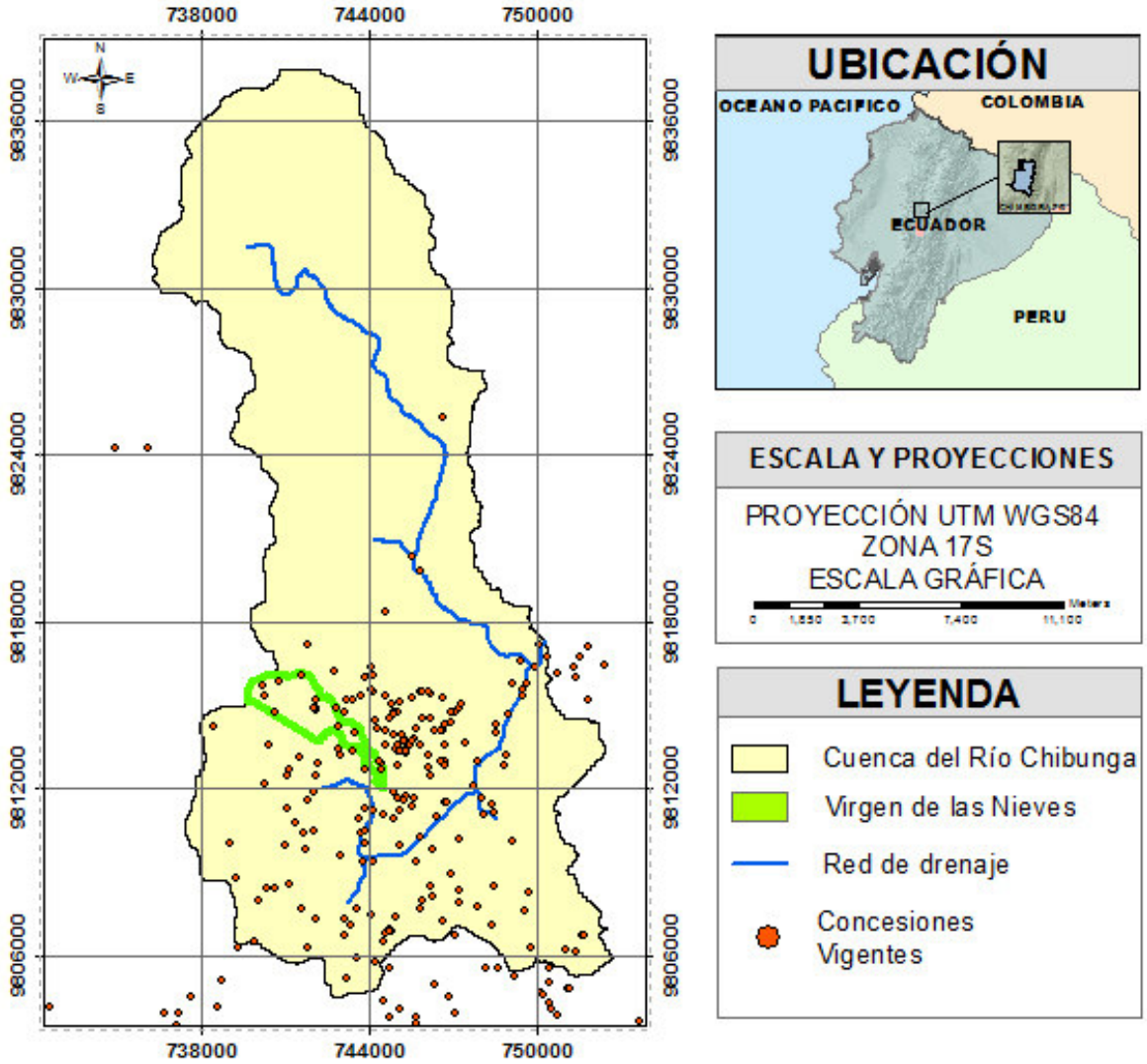


FIGURA 80 Mapa de concesiones dentro del área de interés.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

En el anexo se muestra la concesión de caudales emitida por la Secretaría del Agua, Demarcación Hidrográfica de Pastaza, Centro de atención al ciudadano Riobamba, donde el 18 de mayo de 2018, renueva el caudal de 1.45 l/s, de las aguas provenientes de las vertientes de Lobo Pambashca, Anga Guachana, Yurac Rumi, Corral Pamba, Rincón de Podiopamba, Puñuna Machay y Cascajal. Concesiones otorgadas por un período de 10 años, para regar 5 hectáreas a favor del Directorio de Aguas de la Cooperativa de Producción Virgen de las Nieves. Se ubican en las coordenadas UTM 17S (WGS84) 9.814.714 N y 743.066 O; 9.815.089 N y 743.246 O, políticamente perteneciente al código parroquial 02 Sicalpa, cantón

03 Colta, provincia 06 Chimborazo. La ubicación de las mencionadas concesiones dentro de la Cuenca del rio Chibunga (FIGURA 81).

FIGURA 81 Mapa de la ubicación de las concesiones de la Cooperativa de Producción Virgen de las Nieves.

Elaborado por: Orbe Liseth y Ramos Valeria

De acuerdo con los datos aforados, se pudo verificar que la comunidad Virgen de las Nieves utiliza 7 captaciones, las cuales se encuentran contempladas dentro de la concesión vigente, sin embargo, el caudal total concesionado es de 1.45 l/s mientras que el caudal total aforado promedio en las captaciones es de 10.53 l/s. Cabe recalcar que cada tanque rompe presión cuenta con un sistema para rebosar el agua excedente, la cual se entrega directamente por el talud hacia el río.

Además, de acuerdo con la visita de campo se pudo verificar el cumplimiento de las áreas de protección alrededor de las captaciones, esto respecto al cambio de uso de suelo para agricultura, sin embargo, se pudo evidenciar presencia de desechos de animales en las áreas comprendidas entre el reservorio y las captaciones.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Caracterización de la cuenca e infraestructura:

- ✓ La cuenca del río Chibunga es una cuenca conservada en el área de las captaciones donde no se evidencia la presencia de ganadería ni cambios de uso de suelo, sin embargo, en las áreas cercanas a la reserva se realiza pastoreo y siembra de cultivos rotativos. Su suelo es tipo franco arcilloso con textura media y cobertura de vegetación arbustiva y herbácea. Esta cuenca es alargada, con poca tendencia a concentrar el escurrimiento producido por una lluvia intensa, además según las bifurcaciones de sus cauces es una corriente de tercer orden, tiene como principal afluente la Quebrada Salada.
- ✓ Las captaciones en su mayoría están conformadas por zanjas de drenaje, las demás captan el agua a través de diques, en ambos casos se recolecta y se conduce el agua mediante tubería de PVC a los tanques. La red de conducción está compuesta de tanques rompe presiones y tuberías de PVC que llegan hasta el reservorio. Esta infraestructura hidráulica se encuentra operativa para los periodos húmedos y secos, tiene un tiempo aproximado de servicio de 10 años por lo que es necesario un mantenimiento programado sobre los tanques rompe presiones. Adicionalmente, con la finalidad de optimizar el sistema de riego, se contempla la redistribución de la asignación de turnos manteniendo uno de los tanques de reserva cumpliendo con la función de almacenar recurso hídrico.
- ✓ La red de distribución para riego por aspersión, solamente es utilizada en los turnos nocturnos, y está trabajando con un máximo de 5 aspersores por dos horas, sin embargo, tiene la capacidad de funcionar con los 78 aspersores en un mismo turno. Mientras que los turnos diurnos son dotados por la red de distribución de riego a gravedad mediante un canal abierto de terrocemento, la misma que se encuentra en malas condiciones por el desgaste del material y la falta de mantenimiento, lo que genera una pérdida

de caudal de alrededor del 40%. Además, el material de los canales secundarios de tierra produce grandes pérdidas por infiltración lo que vuelve ineficiente al sistema.

Recurso hídrico disponible:

- ✓ Mediante la trasposición de caudales con la estación H787, se calculó el caudal de las 7 captaciones alcanzando un total de recurso hídrico de 9.79 l/s, valor que se comprobó con los caudales mínimos aforados y que se espera se presenten en el periodo seco. En el período húmedo se tiene un 16% adicional de recurso hídrico alcanzando un caudal de 11.67 l/s. De acuerdo al análisis realizado sobre el cultivo de papa, éste requiere de 1.2 l/s cada 7 días, por lo que el caudal disponible es suficiente para abastecer a los usuarios actuales y además permitiría ampliar el número de turnos simultáneos en el riego por gravedad.
- ✓ Según la Resolución al requerimiento No. 466-2013-RV, la SENAGUA emite una concesión de 1.45 l/s, obtenida de 7 fuentes de agua, por un periodo de 10 años, esto es hasta el 2028, para el riego de 5 hectáreas en favor de la Cooperativa de Producción Virgen de Las Nieves. Mientras que, de los aforos en las captaciones se tiene un caudal total disponible de 9.39 l/s para el período seco y 11.68 l/s para el período húmedo, lo que implica que se capta actualmente 6.48 veces y 8.05 veces del caudal concesionado en los períodos seco y húmedo, respectivamente. Sin embargo, dado el tamaño de los tanques rompe presiones, alrededor del 20% excede y escurre hacia el cauce cercano, por lo que, el caudal utilizado y aforado en el tanque de reserva es de 7.41 l/s y 9.75 l/s en los períodos seco y húmedo, respectivamente. En el artículo 131 de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua, se especifica que la Entidad reguladora se encargará de la reasignación de las concesiones autorizadas, por lo que es necesario que esta entidad realice el monitoreo respectivo, con la finalidad de corroborar los caudales aforados en el presente estudio, para diferentes estaciones climáticas y así evitar que el sistema de riego Virgen de las Nieves pueda incurrir en un incumplimiento.

Requerimiento de agua de los cultivos:

- ✓ En la Comunidad Virgen de las Nieves, los turnos de riego a gravedad y de aspersión se asignan al usuario, independientemente del número de terrenos que posea, tipo de cultivo, superficie y ubicación del terreno. Además, el caudal es variable desde el tanque hasta el terreno de turno, por las pérdidas de infiltración provocadas por el tipo de material de los canales de distribución y la longitud de recorrido. Se realizó el análisis de requerimiento de agua para cultivos propios de la zona, se tomó el caso específico de un lote con cultivo de papa (lote que se encontraba con turno durante la visita de campo), se consideró un suelo franco arcilloso, periodos de siembra recomendados por la FAO y precipitación efectiva. Este requerimiento de agua fue comparado con el valor real aplicado sobre el cultivo de papa, donde se evidencia que la dotación de agua es 50% mayor a su requerimiento en la línea de riego por gravedad para la papa.

Propuesta de optimización:

- ✓ Se propone optimizar el sistema de riego de Virgen de las Nieves mediante:
  - Reasignación de turnos considerando el cultivo de mayor requerimiento hídrico, tanto en línea de riego a gravedad como en la red de riego a aspersión. En el turno diurno se considera posible la asignación de un turno de dos horas cada 7 días mediante el reservorio 1, mientras que el exceso de recurso hídrico disponible se utilizaría para llenar el reservorio 2. Para el turno nocturno se considera mantener la asignación actual (un turno de dos horas cada 7 días del reservorio 2), mientras se llena el Reservorio No. 1 del sistema.
  - Mediante Watergems se modeló una nueva línea de aspersión con 30 unidades, de forma que se implemente en el turno diurno y que trabaje simultáneamente con el riego a gravedad. Esta línea se aplicariá en uno de los sectores que se abastecen de agua mediante riego por gravedad, pero que se encuentra alejado de la línea principal (tierra cemento) y que lleva agua únicamente por canales de tierra, por lo que las pérdidas por infiltración son muy altas.

5.2 RECOMENDACIONES

Gestión y manejo de la cuenca:

- ✓ Se recomienda realizar un programa de capacitación relacionado con la conservación de cuencas, ya que se evidenció la presencia de desechos orgánicos ganaderos en las áreas cercanas a los reservorios, aunque en ninguna visita se comprobó el uso de paramos para pastoreo. Además, dicho programa debe ser socializado con los usuarios ya que se observó basura inorgánica, producto de paseos familiares.
- ✓ En la zona de límite agrario, se recomienda la implementación de cercas, para evitar pastoreo, abrevaderos, cambios de uso de suelo, esto para poder cumplir con lo establecido en la normativa legal vigente, ya que solicita un área de protección a los alrededores de las fuentes concesionadas.

Mantenimiento y operación del sistema:

- ✓ Para el sistema de riego se recomienda realizar y aplicar un manual de mantenimiento y operaciones con la finalidad de garantizar el lavado de las redes y evitar el taponamiento que puede ser causado por la sedimentación por las bajas velocidades.
- ✓ Respecto a los diferentes recorridos, se observó que los canales de tierra cemento del sistema a gravedad, se encuentran en malas condiciones produciendo infiltración y pérdidas del recurso, además existe una cantidad considerable de basura en el mismo, en especial en los ingresos a los terrenos de turno, por lo que se recomienda un mantenimiento y una sociabilización de buenas prácticas entre los usuarios.

Uso de modelos

- ✓ Se recomienda realizar campañas de medición de las características del suelo con los cultivos de nuestras zonas andinas, de forma que se puedan ajustar y verificar los cálculos del requerimiento de agua realizados con el software Cropwat mediante la base de datos de la FAO.

- ✓ Socializar los resultados obtenidos del CROPWAT, con los usuarios del sistema de riego, de manera que se dé a conocer la necesidad de utilizar la cantidad requerida por los cultivos, ya que permitirá mantener la producción e implementar el área de riego.
- ✓ El software Watergems pese a ser una herramienta importante para la evaluación de infraestructura hidráulica, presenta una limitada aplicación en el tipo de sistemas de riego que se tienen en las áreas rurales del país. Por esta razón, se usaron varios artilugios para la modelación del Sistema de Riego Virgen de las Nieves

Acciones a futuro:

- ✓ Ya que los cultivos se realizan según las necesidades alimenticias de cada usuario, se recomienda implantar rotaciones de cultivo según su época, y dotar de un caudal fijado por el cultivo con mayor requerimiento.
- ✓ El Sistema de Riego Virgen de las Nieves, posee el recurso hídrico suficiente para optimizar su disponibilidad y mediante la correcta reserva se puede abarcar nuevas áreas de riego, lo cual ha sido solicitado por los habitantes.
- ✓ Debido a la Emergencia Sanitaria Nacional por el COVID19, se realizaron los aforos únicamente en el terreno que tenía asignado el turno durante las visitas a la comunidad, por lo que se recomienda realizar campañas de medición en diferentes épocas y diferentes terrenos, con la finalidad de representar el funcionamiento de la red de distribución en una frecuencia de turnos en toda la comunidad.
- ✓ Se recomienda implementar instrumentación para la medición de caudales, velocidades y/o presiones en varios tramos del sistema con la finalidad de verificar las condiciones en las cuales se encuentra trabajando.

CAPÍTULO 6

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida M. (2010). *Instructivos de procesamiento de información hidrometeorológica.* Quito. Ecuador.

Bentley Institute. (2012). *WaterCAD/GENS V8i. Curso de Modelación y Diseño de Sistemas de Distribución, intermedio (Sistema métrico).* Bentley Institute. Colombia.

Caicedo, O., Balmaseda, C. y Proaño, J. (2015). *Programación de riego del banano (Musa paradisiaca) en finca San José 2, los Ríos, Ecuador*. Universidad Técnica de Babahoyo. Ecuador. Rev. Cie. Téc. Agr. vol.24 no.2. Los Ríos. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542015000200003

Calderón, S. (2014). *Evaluación del recurso hídrico en la eficiencia del desarrollo de los cultivos en cinco barrios de Tumbaco, Pichincha*. Universidad Central del Ecuador. Quito. Ecuador.

Chiriboga, M. (2004). *Elementos para un Programa de Investigación Agraria. Consultoría contratada para el Sistema de Investigaciones sobre la Problemática Agraria en el Ecuador (SIAPE).* Quito. Ecuador

Chow, V. Maidment, D. y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill Interamericana. Editorial Nomos. Santa Fé Bogotá. Colombia.

Chow, V. (1992). *Hidráulica de los canales abiertos*. McGraw Hill Interamericana. Editorial Nomos. Santa Fé Bogotá. Colombia.

CIREN. (2007). *Optimización de sistemas de riego en las cuencas Copiapo y Huasco.* Gobierno de Chile. Chile.

CNRH (2002) *Gestión de los recursos hídricos del Ecuador: políticas y estrategias. Informe Ejecutivo*. Quito. Ecuador

Collado, E., Saez, Y. (2017) *Sistema de Riego Inteligente para Optimizar el Consumo de Agua en cultivos en Panamá.* Universidad Tecnológica de Panamá. 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Global Partnerships for Development and Engineering Education. Estados Unidos, Florida.

CONAGUA (2019) *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable*. Vol. 12 Pag 73. ISBN: 978-607-626-012-8 México.

Constitución de la República del Ecuador. 20 de octubre de 2008. Art. 12 – 42 – 263- 282 – 318. Quito, Ecuador: Asamblea Constituyente. Registro oficial 449. Recuperado de http://biblioteca.defensoria.gob.ec/handle/37000/2109

Crane & Valfisa (1989). *Flujo de fluidos en valvulas, accesorios y tuberias.* McGraw Hill Interamericana.

Dagnino J. (2014). *Correlación*. Revista Chilena de Anestecia. Volumen 43, 150-153. Páginas 4.

Diaz, Á., & Mercado, T. (2017). *Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG.* Ingeniería y Desarrollo. Córdova. Colombia.

Estrada R., Chaparro O. y Rivera B., (1999). *Utilización de modelos de Simulación para evaluación Ex-ante. Instrumentos Metodológicos para la toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales*. Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Cali. Colombia.

FAO (2006) *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos No. 56.* Estudio FAO Riego y Drenaje. Roma.

Ferrer M., Rodríguez J., Estrela T., (1995). *Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica.* Ingeniería del agua. Vol 2. Num. 4.

GADPCH. (2008) *Inventario de Recursos Hídricos del Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Chimborazo*. Chimborazo. Ecuador.

García I. & Briones G. (2015). *Sistemas de riego por aspersión y goteo.* México: Trillas.

GEO Tutoriales. (2015). Cómo se relaciona el coeficiente de correlación de Pearson (r) t el coeficiente de determinación (r^2). https://www.gestiondeoperaciones.net/estadistica/como-se-relaciona-el-coeficiente-de-correlacion-de-pearson-r-y-el-coeficiente-de-determinacion-r-cuadrado-r%C2%B2/

Guerra M., (2009). *Manual de Diseño de Sistemas de Riego a Gravedad y por Aspersión.* Universidad San Francisco de Quito. Ecuador.

Hajkowicz, S. y Collins, K. (2007) *A review of multiple criteria analysis for water resource management.* Water Resources Management.

Horton, R. (1933) *The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle*. Transactions of the American Geophysical Union. http://dx.doi.org/10.1029/TR014i001p00446

Lapo C. y Pérez R, (2013). *Diseño óptimo de sistemas de riego a presión Aplicación en casos (Ecuador)*. Revista de Investigación Agraria y Ambiental - Universidad Nacional Abierta y a Distancia Particular de Loja. Ecuador

Larrea, D., Sosa, B. (2014) *La tecnificación de la agricultura familiar bajo riego en Ecuador.* Quito. Ecuador: Editorial CAMERAN.

Ley Orgánica de Recursos Hídricos, usos y aprovechamiento. Art. 12, 39, 40, 41, 47 – 67 -74 – 83 – 86 – 87 – 130 – 141.

Liu, S., Konstantopoulou, F., Gikas, P. y Papageorgiou, L. (2011) *A mixed integer optimization approach for integrated water resources management.* Computers and Chemical Engineering.

Lu, H.W., Huang, G.H., Zhang, Y.M. y He, L. (2012) *Strategic agricultural land-use in response to water- supplier variation in a China´s rural region.* Agricultural Systems.

MAAMA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013) *Gestión sostenible de regadíos*. Ecuador. Página web: http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-sostenible-de-regadios/#para2

Martínez, L. (2016) *Propuesta de rehabilitación para la red de abasto de agua potable de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba, Santa Clara

Medellín-Azuara, J., Mendoza-Espinosa, L., Lund, J. y Ramírez, R.J. (2007). *"The application of economic-engineering optimization for water management in Ensenada, Baja California, Mexico*". Water Science and Technology, (pp. 339-347).

Mesa, O. (2018). *Cuatro modelos de redes de drenaje*. Universidad Nacional de Colombia.

Mihajlovich, D. (1979) *Aplicación de riego en Honduras.* SERNA. PNUD. FAO.

Molinos, M., Hernandez, F. Mocholi, M. y Sala, R. (2013). *Optimización de la gestión de recursos hídricos en cuencas deficitarias.* Universidad de Valencia.

Mongil, L. (2012). *Adaptación de las tablas del Número de Curva para las principales formaciones vegetales naturales de la provincia de Ávila.* España.

Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. 1ra ed. Medellín. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Mullo, J. (2016) *Diseño de un sistema de riego parcelario para la comunidad San Pedro, ubicada en la Parroquia La Matriz, Cantón Guamote*. Universidad San Francisco de Quito. Ecuador, Quito

Naranjo P., (1981*), El Clima del Ecuador*, Edición Casa de la Cultura Ecuatoriana. Quito. Ecuador.

NRCS National Resources Conservation Services (1986). *Chapter 10 Estimation of direct runoff from storm rainfall. Part 630 Hydrology.* National Engineering Handbook. US Department of Agriculture-NRCS. Washington D.C.

NRCS National Resources Conservation Services (2004). *Chapter 9 Hydrologic Soil-Cover Complexes. Part 630 Hydrology.* National Engineering Handbook. US Department of Agriculture-NRCS. Washington D.C.

Nieto, C. Pazmiño, E. Rosero, S. y Quishpe, B., (2018) *Estudio del aprovechamiento de agua de riego disponible por unidad de producción agropecuaria, con base en el requerimiento hídrico de cultivos y el área regada, en dos localidades de la Sierra ecuatoriana.* Quito. Ecuador.

OMM. Organización Meteorológica Mundial, (2007). *Función de las normales climatológicas en un clima cambiante.* Ginebra

Pazmiño, E. (2016). *Análisis de la eficiencia de uso del agua de riego por Unidad de Producción Agropecuaria, con base en los requerimientos hídricos de cuatro cultivos, en la parroquia rural Cangahua, Cantón Cayambe*. Ecuador.

Pereira, L. & Trout, T. (1999). *Irrigation Methods. Irrigation and Drainage*. Handbook of Agricultural Engineering. Ed. CIGR-The International Commission of Agricultural Engineering. ASCE, 297

Plan Nacional del buen vivir 2017-2021. Quito. Ecuador.

Pourrut, P. (1983). *Los climas del Ecuador – Fundamentos Explicativos.* Estudio dentro del marco del convenio entre la ORSTOM y PRONAREG.

Pourrut, P., Róvere O., Romo I., y Villacrés H. (1995). *El agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía*. Clima del Ecuador, Quito, Ecuador. RR Editores Asociados. Estudios de Geografía Volumen 7.

PPRDCH, (2018). *Plan Provincial de Riego y Drenaje*, Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial Chimborazo. Ecuador.

Pucha, E. (2013). *Análisis de las formas de liderazgo de los Gobiernos Comunitarios de la Organización – UODIC (Union de Organizaciones de Desarrollo Integral de Cicalpa) de la parroquia Cicalpa del puebo Puruway.* Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. Quito. Ecuador.

Ramos J. y Salazar C., (2013). *Análisis y optimización hidráulica del sistema de captación del canal de riego Alumís bajo en la provincia de Cotopaxi.* Escuela Politécnica Nacional. Ecuador, Quito

Reca, J., Roldán J., Alcaide, M., López, R. y Camacho, E. (2001) *Optimisation model for water allocation in déficit irrigation systems II. Application to the Bémbezar irrigation system.* Agricultural Water Management.

Rejani, R., Jha, M. y Panda, S. (2009) *Simulation-optimization modelling for sustainable groundwater management in a coastal basin of Orissa, India*. Water Resources Management.

Rueda, V. (2017) *Estimación de la huella hídrica de los cultivos de palma africana y maíz duro en la provincia de los Ríos y caña de azúcar en la provincia del Guayas para la producción de biocombustible.* Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador.

Sandoval, E. (2017). *Estimación de la huella hídrica en los cultivos de quinua (chenopodium quinoa) de los cantones Cayambe y Riobamba Ubicados en los andes ecuatorianos*. Universidad Politécnica Salesiana. Quito. Ecuador.

SENAGUA (2011). *Estado situacional del Ecuador en cuanto al manejo de los recursos hídricos. Oferta y demanda hídrica en Ecuador.* Secretaría Nacional del Agua

SINGH, V. (1992). *Elementary Hydrology*. Prentice Hall, 973 pp.

Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General*. Vol. 1. Fundamentos México. Limusa. Grupo Noriega editores.

Tapia D. (2014). *Manual de diseño de sistemas de riego tecnificado*. Universidad Central del Ecuador. Ecuador, Quito

Vargas, J., de la Fuente, L. y Arumí, J. (2012). *Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso*. Obras y Proyectos (pp. 12, 32-41)

Villacis, O., y Andrade, L. (1985), *Guía de hidrología aplicada para minicentrales hidroeléctrica*. Quito. Ecuador.

Villafuerte S. (2010). *Diseño de captación, conducción principal, reservorio y redes secundarias del proyecto de riego Cariacu – Romerillos.* Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito. Ecuador.

Villón M. (2003) *HCanales La forma fácil de diseñar canales*. Escuela de Ingeniería Agrícola. Editorial Tecnológica del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago. Costa Rica.

Zapata, A., Gasselin, P., (2005) *El riego en el Ecuador: problemática, debate y políticas.* Quito, Ecuador. CESA Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas