ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

DEFINICIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS MEDIANTE MODELACIÓN HIDROLÓGICA CONCEPTUAL: CASO DE LA CUENCA JATUNHUAYCU EN LAS CERCANÍAS DEL VOLCÁN ANTISANA

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

YANDRI JOSÉ JUMBO CARDENAZ

yandrhy01@yahoo.es

DIRECTOR: Dr. Christian Gonzalo Domínguez González.

christiang.dominguezg@gmail.com

CO-DIRECTOR: Dr. Marcos Joshua Villacís Erazo.

marcos.villacis@epn.edu.ec

Quito, Septiembre 2017

DECLARACIÓN

Yo, Yandri José Jumbo Cárdenaz, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he 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.

YANDRI JOSÉ JUMBO CARDENAZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Yandri José Jumbo Cárdenaz, bajo mi supervisión.

Dr. Christian Domínguez.	**Dr. Marcos Villacís.**
DIRECTOR	**CO-DIRECTOR**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional por los conocimientos adquiridos en estos años, a todos sus docentes y personal administrativo. Un gran agradecimiento a los Doctores Marcos Villacís y Christian Domínguez por su dirección y tutela para el desarrollo de la presente investigación.

Así mismo quiero evidenciar mi agradecimiento al Fondo de Protección del Agua FONAG, en la persona del Doctor Bert De Briéve, agradecimiento al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI, a mí colega Sergio Torres y a todos quienes de alguna manera contribuyeron al presente trabajo de Tesis.

DEDICATORIA

Dedico el presente documento en primer lugar a Dios y a la Virgen del Cisne por permitirme cumplir un objetivo más en mi vida. Además a mis padres Dolores y Juan por haberme inculcado los mejores valores y por haber cultivado en mí la perseverancia que me permite seguir siempre adelante. Agradezco y dedico también a mis amores Leiddy y Alexander porque son los testigos de mi esfuerzo y mi razón de vivir.

CONTENIDO

DECLARACIÓN ii
CERTIFICACIÓN iii
AGRADECIMIENTOS iv
DEDICATORIA v
CONTENIDO vi
ÍNDICE DE TABLAS ix
ÍNDICE DE FIGURAS x
SIMBOLOGÍA xiii
RESUMEN xiv
ABSTRACT xv
CAPÍTULO 1 1
INTRODUCCIÓN 1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1
1.2 JUSTIFICACIÓN 2
1.3 OBJETIVO GENERAL 3
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3
1.5 HIPÓTESIS 4
CAPÍTULO 2 5
INFORMACIÓN HIDROFÍSICA, HIDROMETEOROLÓGICA, GEOLÓGICA DE LA CUENCA DE JATUNHUAYCU 5
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 5
2.2 HIDROGRAFÍA 7
2.3 METEOROLOGÍA 9
2.4 DIVERSIDAD FLORÍSTICA 10
2.5 GEOLOGÍA 13
2.6 SUELOS 17
2.7 HUMEDAD DEL SUELO 21
2.8 RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DEL SUELO Y LA HUMEDAD DEL SUELO 23
CAPÍTULO 3 26
METODOLOGÍA 26
3.1 ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS 26
3.1.1 Información Cartográfica Disponible 26
3.1.2 Equipos y Serie Disponible 26

3.1.3 Relleno de Datos 29
3.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA 30
3.2.1 Restitución Cartográfica 32
3.2.2 Precipitación Media 33
3.2.3 Temperatura 35
3.2.4 Evapotranspiración 38
3.2.5 Caudales 39
3.2.6 Humedad Del Suelo 40
3.3 PROCESO DE APLICACIÓN DEL MODELO GR4J 40
3.3.1 Descripción del Modelo Hidrológico GR4J 40
3.3.2 Programación y Parámetros del Modelo 44
3.4 CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO 44
3.4.1 Nash Sutcliffe 44
3.4.2 Solver 45
3.4.3 Factor de Corrección del Área Equivalente de Recarga Hídrica 45
3.5 BALANCE HÍDRICO 46
CAPÍTULO 4 49
4.1 CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA Y CLIMÁTICA 49
4.1.1 Precipitación 49
4.1.2 Temperatura 53
4.1.3 Evapotranspiración 55
4.1.4 Caudal 58
4.1.5 Humedad del Suelo 61
4.2 BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA, UNIDAD DE ESTUDIO Y SUS MICROCUENCAS 63
4.3 RESULTADOS DE LAS CORRIDAS DEL MODELO GR4J 64
4.3.1 Simulación de Caudales y Calibración de Parámetros 64
4.3.2 Balance Hídrico con el Modelo 70
4.3.3 Factor De Corrección Del Área De Recarga Hídrica 72
4.4 DISCUSIÓN SOBRE LA MODELACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS 75
4.5 COMPARACIONES DEL MODELO CON OTROS TRABAJOS RELACIONADOS 77
CAPÍTULO 5 81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 81
5.1 CONCLUSIONES 81
5.2 RECOMENDACIONES 84
BIBLIOGRAFÍA 86
ANEXO N° 1 94
UBICACIÓN DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL A NIVEL DE CUENCA, PROVINCIA Y PAÍS. 95

ANEXO N° 2 96
UBICACIÓN DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL JATUNHUAYCU DENTRO DEL ÁREA DE CONSERVACIÓN HÍDRICA ANTISANA ACHA, PRIORIDADES DE ZONAS DE RESTAURACIÓN. 96
ANEXO N° 3 97
EJEMPLOS DE ECUACIONES DIARIAS OBTENIDAS DE LA RELACIÓN TEMPERATURA Y ALTITUD CON ESTACIONES SOBRE LOS 3000 MSNM. 97
ANEXO N° 4 99
DISTRIBUCIÓN DEL CONJUNTO DATOS OBSERVADO EN DIAGRAMA DE CAJAS, PRESENCIA DE DATOS ATÍPICOS. 99

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 Extensión coberturas vegetales y nivel degradación en el ACHA. 11
TABLA 3.1 Referencia altitudinal de las ocho estaciones pluviométricas dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu. 27
TABLA 3.2 Coeficiente de determinación R^2 entre las diferentes estaciones pluviométricas de Jatunhuaycu. 29
TABLA 3.3 Estaciones c on datos de temperatura utilizadas en el modelo de regresión. 36
TABLA 3.4 Parámetros del modelo GR4J. 44
TABLA 4.1 Precipitación media anual y promedios diarios en cada estación de monitoreo. 51
TABLA 4.2 Evapotranspiración real en relación a la ubicación de las estaciones de monitoreo de la precipitación. 56
TABLA 4.3 Relaciones área y caudal para las microcuencas y unidad de estudio..... 59
TABLA 4.4 Aforos en los principales cauces dentro de la cuenca Jatunhuaycu. FUENTE: EPMAPS..... 59
TABLA 4.5 Balance hídrico de la unidad y microcuencas de estudio..... 63
TABLA 4.6 Balance hídrico de la cuenca Jatunhuaycu. 64
TABLA 4.7 Coeficiente de Nash y parámetros calibrados en el modelo. 64
TABLA 4.8 Balance Hídrico con el modelo GR4J. 70

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Ubicación de la zona de estudio en el sistema “La Mica Quito Sur”. FUENTE: EPMAPS 6
FIGURA 2.2 Ubicación de las microcuencas anidadas para el análisis en el estudio. FUENTE: Imagen ALOS 2007 PRAA. 8
FIGURA 2.3 Zonificación de la cobertura vegetal de la unidad experimental de estudio. FUENTE: (PRAA & CONDESAN, 2013)..... 12
FIGURA 2.4 Mapa de Pendientes. 14
FIGURA 2.5 Geología de la unidad experimental Jatunhuaycu. FUENTE: (Alvarado, 2009)..... 15
FIGURA 2.6 Levantamiento Geológico en el Antisana, zona de estudio Jatunhuaycu (G & I). 16
FIGURA 2.7 Contenidos de materia orgánica en la unidad en estudio 19
FIGURA 2.8 Contenidos de carbono orgánico en la unidad en estudio. 20
FIGURA 2.9 Dinámica diaria de la humedad del suelo en el horizonte A de acuerdo a los datos de TDR en la parte media de la unidad experimental de estudio. 22
FIGURA 2.10 Dinámica diaria de la humedad del suelo en el horizonte 2Ab de acuerdo a los datos de TDR en la parte media de la unidad experimental de estudio. 23
FIGURA 2.11 Correlación entre la densidad aparente, porosidad, materia orgánica y punto de saturación con la humedad del suelo. 24
FIGURA 3.1 Serie de datos diarios usados en la modelación con el GR4J para en la evaluación hidrológica de la unidad Jatunhuaycu. 28
FIGURA 3.2 Tendencia y ecuación de relleno de datos para P1 y P2 29
FIGURA 3.3 Tendencia y ecuación de relleno de datos para P3 y P5 30
FIGURA 3.4 Tendencia y ecuación de relleno de datos para P6 y P8 30
FIGURA 3.5 Imagen 3D de la corrección del límite de la unidad de estudio .. 32

FIGURA 3.6 Distribución de las áreas aferentes según los polígonos de Thiessen..... 34
FIGURA 3.7 Modelo para la obtención de la precipitación anual 34
FIGURA 3.8 Ubicación de las estaciones en la cuenca Alta del Guayllabamba 37
FIGURA 3.9 Diagrama de la estructura del modelo GR4J 42
FIGURA 4.1 Distribución de la precipitación anual en la unidad experimental Jatunhuaycu. 50
FIGURA 4.2 Polígonos de Thiessen usados en la distribución de la precipitación media diaria..... 51
FIGURA 4.3 Distribución de la precipitación diaria en la unidad experimental Jatunhuaycu. 52
FIGURA 4.4 Ejemplo de la forma de la ecuación usada en la estimación de la temperatura para Jatunhuaycu..... 53
FIGURA 4.5 Evaluación de datos estimados y reales de temperatura máxima..... 54
FIGURA 4.6 Evaluación de datos estimados y reales de temperatura mínima. 54
FIGURA 4.7 Regresión lineal para la obtención de la *Eto* en la unidad experimental..... 55
FIGURA 4.8 Distribución de la *ETr* anual en la unidad de estudio. 56
FIGURA 4.9 Distribución de la *ETr* diaria en la unidad de estudio. 57
FIGURA 4.10 Variabilidad de la *ETr* media diaria a nivel anual para la unidad experimental Jatunhuaycu..... 58
FIGURA 4.11 Ubicación referencial de los puntos de aforo y distribución de la precipitación media anual en toda la cuenca Jatunhuaycu. 60
FIGURA 4.12 Humedad del suelo en dos horizontes en la parte media de la unidad experimental de estudio..... 62
FIGURA 4.13 Hidrograma de caudales simulados y observados en la microcuenca uno..... 65

FIGURA 4.14 Hidrograma de caudales simulados y observados en la microcuenca uno en el periodo 17-01-2014 a 16-01-2015..... 67
FIGURA 4.15 Hidrograma de caudales simulados y observados en la microcuenca dos. 68
FIGURA 4.16 Hidrograma de caudales simulados y observados en la microcuenca tres. 69
FIGURA 4.17 Hidrograma de caudales simulados y observados en la unidad experimental de estudio Jatunhuaycu. 69
FIGURA 4.18 Balance Hídrico para las microcuencas uno (a) y dos (b) ELABORACIÓN: Autor..... 71
FIGURA 4.19 Balance Hídrico para las microcuencas tres (c) y unidad experimental Jatunhuaycu (d). 72
FIGURA 4.20 Área equivalente de la unidad en estudio y sus microcuencas. 74
FIGURA 4.21 Ubicación de las cuencas aportantes al sistema “La Mica” Quito Sur, flecha indicativa de la dirección del flujo subterráneo. FUENTE: (Alvarado, 2009) 776

SIMBOLOGÍA

Subíndice	**Término**
l/s	Litros por segundo
MW	Mega watts
km	Kilómetro
km^2	Kilómetro cuadrado
JTU-M1	Microcuenca anidada uno
JTU-M2	Microcuenca anidada dos
JTU-M3	Microcuenca anidada tres
($\mu S/cm^2$)	Micro Siemens por Centímetro cuadrado
mm	Lámina de agua, un litro en un metro cuadrado
°C	Grados centígrados
mbar	Milibar
meq/100 ml	Milequivalente para cien mililitros
ppm	Partes por unidad
dS/m	deciSiemens por metro
mm h^{-1}	Milímetros por hora
cm^3 cm^{-3}	Centímetro cubico por centímetro cubico
r^2	Coeficiente de correlación de Pearson
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm $día^{-1}$	Milímetros por día

RESUMEN

La evaluación de la disponibilidad hídrica es importante en la gestión integral de los recursos hídricos. Dicha disponibilidad se puede evaluar mediante el uso de modelos hidrológicos, específicamente para determinar las áreas contributivas de las cuencas hidrográficas; las cuales son de interés para la preservación del recurso. Este trabajo tiene como objetivo determinar las áreas de recarga contributivas de las cuencas hidrográficas dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu que aporta al sistema de captación "La Mica Quito Sur", indispensable para el abastecimiento de agua hacia la ciudad de Quito (Ecuador). Las áreas contributivas se determinaron utilizando una modificación del modelo hidrológico determinístico agregado GR4J, permitiendo simular el caudal diario de la unidad experimental y de tres de sus microcuencas. La calibración de este modelo, permitió determinar un coeficiente que relaciona el área de las cuencas con su respectiva área de contribución al caudal de las mismas. Para la implementación del modelo GR4J se usó series diarias de precipitación y evapotranspiración como entradas del mismo, y series de caudales para su calibración. Los resultados de las simulaciones muestran que en las cuatro cuencas existen pérdidas por percolación profunda y que por consecuencia, sus superficies de recarga son menores al tamaño de real de las mismas (entre 50,5 % y 79,0 %). Las pérdidas en estas cuencas, que posiblemente se relacionan con la presencia de la formación geológica de Yacupamba y a zonas lacustres y palustres, podrían contribuir al caudal de la cuenca Jatunhuaycu aguas abajo, cercano al punto de captación.

Palabras clave: Antisana, hidrología, modelo conceptual, caudal, evapotranspiración.

ABSTRACT

The assessment of water availability is important in the integral management of water resources. Such availability can be assessed using hydrological models, specifically to estimate the contributory areas of watersheds; which are important to the preservation of the resource. The objective of this work is to determine the contributory recharge areas of the hydrographic basins within the Jatunhuaycu experimental unit, that contribute to "La Mica Quito Sur" catchment system, which is indispensable for the water supply to the city of Quito (Ecuador). The contributory areas were determined using a modified GR4J deterministic hydrological model, which allows the simulation of the experimental unit daily flow, as well of three of its micro basins daily flow. The calibration of this model, allowed the estimation of a coefficient that relates the basin areas with their respective contribution area to the overall basin discharge. The implementation of the GR4J model requires daily series of precipitation and evapotranspiration as inputs, and discharge series for its calibration. The results of the simulations show that the four basins have losses in form of deep percolation and that consequently, their recharge surfaces are smaller than their respective hydrographic basin (between 50.5% and 79.0%). Losses in these basins, which are possibly related to the presence of the Yacupamba geological formation and to marsh areas, could contribute to the downstream flow of the Jatunhuaycu basin, close to the catchment point.

Keywords: Antisana, hydrology, conceptual model, flow, evapotranspiration.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La evaluación de la disponibilidad hídrica para el Distrito Metropolitano de Quito es objeto de interés en relación al manejo adecuado de los recursos hídricos provenientes de las partes altas de las cuencas hidrográficas circundantes. Estas cuencas están principalmente cubiertas de páramos y arbustales, sin embargo en algunas de ellas existen pequeñas coberturas de glaciares cuyos aportes son muy significativos en la contribución de caudales (Calispa, 2010). Una de estas cuencas corresponde a la unidad Jatunhuaycu, la cual pertenece en una parte a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS, y la otra al Fondo para la Protección del Agua FONAG, la cual está encargada del manejo de toda la cuenca. Los principales problemas ambientales que afectan a estas zonas se relacionan a la degradación del ecosistema debido a las diferentes actividades antrópicas como incendios, sobre pastoreo de actores externos, que incluye la contaminación del recurso hídrico (*Giardia lamblia* y *Cryptosporidium*), actividades que datan desde la época de la colonia (Aguirre, *et al*., 2013). Esta degradación influye en la lámina de escorrentía así como en la intercepción de neblina que provoque en relación al porcentaje de cobertura vegetal existente. Otro efecto se relaciona con la pérdida de suelo orgánico, lo que resulta en un detrimento sustancial de la regulación hidrológica de las cuencas (Ochoa *et al*., 2016). Las estrategias implementadas por FONAG para revertir los procesos de degradación y manejo de estas áreas, comprenden la restauración activa (forestación), restauración pasiva (guardapáramos, cercados, contención de erosión) e investigación experimental (bombas de semillas, propagación de *Lupinus sp*, propagación clonal de *Stipa sp*), estrategias acompañadas de procesos de monitoreo.

En la actualidad, la incertidumbre en la determinación de los perímetros de protección de las áreas contributivas reales de las cuencas, ha basado el manejo de las mismas en relación al límite topográfico (*divortium aquarium*), que en muchos casos (Guevara, 2014), especialmente en un contexto estrovolcánico, no corresponde a su área efectiva de recarga hídrica, por lo que las actividades de restauración en algunos casos no serán muy efectivas para mejorar el caudal de las mismas (García & Jiménez, 2010; Soto 2007; Montoya & Montoya , 2009), el problema se centraliza en la fiabilidad de la determinación adecuada del perímetro real de recarga hídrica.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La mayor cantidad de agua tratada para Quito proviene de las cuencas altoandinas (páramos) y su disponibilidad está en relación a su manejo sustentable. El problema complejo tiene relación con el limitado conocimiento en la estimación del perímetro del área efectiva de recarga hídrica a nivel de cuenca y la comprensión de su ciclo en relación a la disponibilidad del agua para la demanda en las actividades antropogénicas y de las funciones ecológicas naturales relacionadas.

El presente estudio surge como propuesta para investigar las zonas de recarga hídrica en relación a las variables hidrometeorológicas del sitio experimental de la unidad Jatunhuaycu, disminuyendo la incertidumbre en la determinación de los posibles límites de su cuenca hidrogeológica y contribuyendo a la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) de la misma.

La modelación hidrológica con el modelo GR4J permitirá evaluar el comportamiento hidrológico de la unidad en estudio, analizando dos posibilidades, la de la existencia de una cuenca geológica más amplia que la unidad hidrográfica Jatunhuaycu o en contraste una superficie de recarga de menor extensión. La calidad de los resultados de la modelación, se basa en la suficiente información hidroclimática y la calidad de la misma, que en Ecuador está en su mayoría manejada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI;

existiendo otras organizaciones relacionadas al manejo del recurso hídrico, que mantienen su propio sistema de monitoreo pero a un nivel local y/o regional como el caso del Fondo de Protección del Agua FONAG.

Los resultados que se obtengan de este trabajo podrían ser usados como recomendaciones para enfocar las actividades de intervención en temas de conservación y restauración dentro de la zona de estudio. Así mismo se constituirán en una referencia válida para una adecuada toma de decisiones en relación a la gestión y manejo de los recursos hídricos de cuencas con condiciones similares. El manejo de cuencas hidrográficas para el Distrito Metropolitano de Quito, es de carácter prioritario, pues su población se estima crecerá en un 44 % hasta el año 2040 (Hazen & Sawyer, 2011).

1.3 OBJETIVO GENERAL

Determinar la configuración de cuencas hidrográficas mediante la aplicación de un modelo hidrológico de tipo conceptual, con el objeto de proponer perímetros de protección para la protección de cuencas hidrográficas.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el balance hidrológico de tres microcuencas de la unidad experimental Jatunhuaycu a partir de datos de precipitación, caudal y meteorología con alta resolución temporal.
- Estimar el área contributiva para identificar aportes fuera del límite topográfico de la cuenca mediante la aplicación de un modelo hidrológico conceptual.
- Plantear una propuesta de manejo y conservación para las áreas contributivas estimadas, con el objeto de contribuir a la gestión de los recursos hídricos del sistema de captación “La Mica Quito Sur”.

1.5 HIPÓTESIS

La modelación hidrológica proyectada permitirá simular la producción hídrica de tres subcuencas anidadas dentro de la unidad Jatunhuaycu, en las que se estima que la recarga es significativamente más alta que la descarga.

El modelo GR4J, reproducirá el comportamiento hidrológico de la zona de estudio, cuyos resultados permitirán definir un área aproximada de recarga hídrica, la que inicialmente tendría un límite mayor, en relación a la delimitación topográfica clásica.

CAPÍTULO 2

INFORMACIÓN HIDROFÍSICA, HIDROMETEOROLÓGICA, GEOLÓGICA DE LA CUENCA DE JATUNHUAYCU

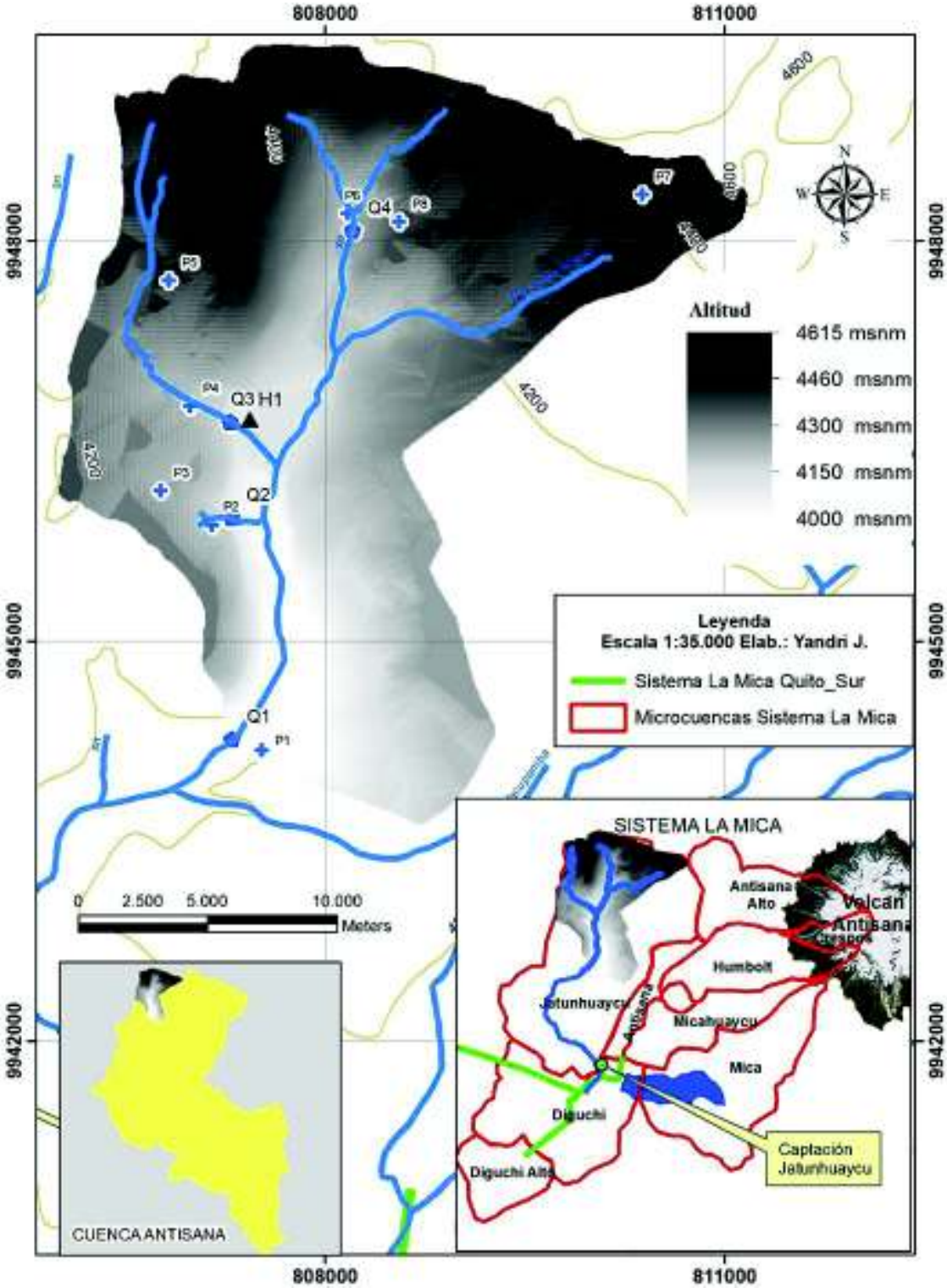
En este capítulo se describe la ubicación geográfica y política de la zona, además de información científica existente de la zona, tales como estudios previos en relación a caudales, precipitación, temperatura, cobertura vegetal, geología, suelos y humedad del suelo.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

A nivel del Ecuador, la unidad experimental en estudio se ubica en la provincia de Napo, cantón Archidona, parroquia Archidona (anexo 1). Desde el punto de vista hidrológico se ubica en la zona alta de la cuenca Jatunhuaycu, dentro de la cuenca del río Antisana, la cual alimenta a la gran cuenca del río Amazonas. Tiene una superficie aproximada de 15,86 km^2 y su rango altitudinal varía de 4000 a 4615 msnm (Figura 2.1). El caudal que se produce en esta cuenca aporta un máximo de 300 l/s (caudal de diseño), 17,6%, al sistema “La Mica Quito Sur” para la dotación de recurso hídrico para el consumo en la zona urbana de Quito con un total de 1700 l/s. (Hazen & Sawyer, 2011) y contribuye directamente en la generación de 9.49 MW desde la Central Hidroeléctrica El Carmen, que aprovecha el caudal de todo el sistema.

La cuenca Jatunhuaycu está dentro del Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA), la cual tiene una superficie aproximada de 7.000 hectáreas, siendo esta área, parte de la zona de amortiguamiento de la Reserva Ecológica Antisana REA (anexo 2).

FIGURA 2.1 Ubicación de la zona de estudio en el sistema “La Mica Quito Sur”.



FUENTE: EPMAPS

ELABORADO: Autor

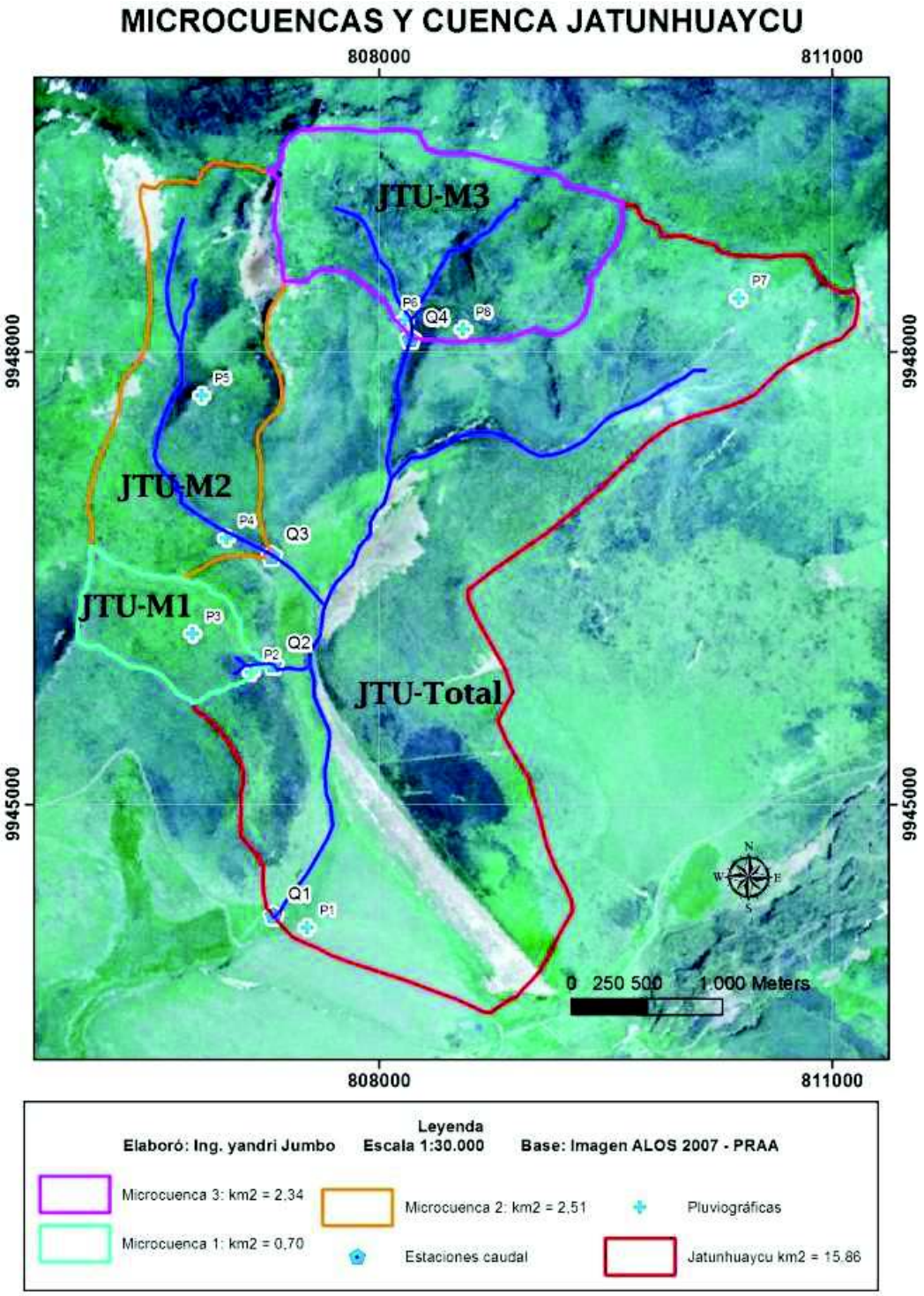
2.2 HIDROGRAFÍA

La cuenca experimental en estudio, Jatunhuaycu, tiene una superficie de 15,86 km^2, la longitud de todos los cauces tiene 13,02 km, el sistema de drenaje o sistema de corrientes superficiales de acuerdo al orden de los afluentes de agua y el grado de división de los ríos corresponde a 3 (Monsalve, 1995). La densidad de drenaje corresponde a 0,82 km/ km^2, considerándose un drenaje pobre. La sinuosidad de las corrientes de agua tiene un valor de 1,07 correspondiente a una categoría de baja sinuosidad y se define entonces, como un río con alineamiento "recto" (Monsalve, 1995).

Dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu (JTU-Total) existen cuatro microcuencas; en este estudio se ha propuesto el análisis de las tres iniciales (Figura 2.2). Las microcuencas JTU-M1, JTU-M2 y JTU-M3 tienen una superficie de 0,70; 2,51; y 2,34 km^2, respectivamente. Las áreas de las microcuencas en este estudio se consideran desde la ubicación de la estación de caudal.

El caudal medio mensual de escorrentía de la cuenca experimental Jatunhuaycu es de 180 l/s, y su caudal específico corresponde a 8,06 l/s/Km^2 (Alvarado, 2009). La zona del Antisana a nivel general presenta una conductividad con un rango comprendido entre 30 a 92 (µS/cm^2), una infiltración media anual de 178 mm y una escorrentía superficial de 467 mm al año (Alvarado, 2009).

FIGURA 2.2 Ubicación de las microcuencas anidadas para el análisis en el estudio.



FUENTE: Imagen ALOS 2007 PRAA.

ELABORACIÓN: Autor

Según Andrade (1996), en su estudio sobre escenarios hidrológicos en la Mica, observó que las cuencas distantes o menos influenciadas de zonas de glaciar, presentan coeficientes de escurrimiento menores a 0.6, para el caso de los ríos Diguchi, Del Salto y Jatunhuaycu. El coeficiente de escurrimiento obtenido para Jatunhuaycu correspondió a 0,31 en un área de 4,41 km^2. En el mismo estudio el coeficiente varía a (+) 0,347 en un escenario hidrológico en el que los aportes medios de los cuerpos hídricos de la zona del volcán Antisana, en los próximos decenios serían menores a los observados en el período de estudio (1980-1990), existiendo según el criterio del autor, una alta probabilidad de ocurrencia. Este escenario consiste en la conformación de series multianuales de caudales medios mensuales, corregidos en función de asumir coeficientes de escurrimiento máximos limitantes para las unidades hídricas aportantes al sistema "La Mica", es decir que las contribuciones medias de los afluentes hídricos en la zona, disminuirían en los próximos decenios, sin embargo el aprovechamiento de los caudales a futuro sería factible dependiendo del comportamiento del clima y del volumen acumulado de agua en el Glaciar Antisana. En el estudio de Ochoa *et al.*, (2016), sobre los impactos del uso de la tierra en la respuesta hidrológica de las cuencas tropicales de los Andes, el coeficiente de escurrimiento para la unidad experimental Jatunhuaycu presenta variaciones dentro de sus microcuencas con valores de 0,08 y 0,37, sin embargo el valor para toda la unidad en estudio corresponde a 0,28. El bajo rendimiento de esta cuenca podría estar relacionado con los caminos de flujo preferencial del subsuelo y del agua subterránea probablemente mejorados por la importante infiltración del suelo en sus perfiles de suelo más profundos (Buytaert et al., 2006a).

2.3 METEOROLOGÍA

A nivel general, la zona tropical andina recibe aportes representativos de la precipitación por la acción de las tormentas de convección profunda, las cuales ocurren en la cordillera, mientras que a 25º Sur la precipitación presenta estabilidad, relacionada con sistemas frontales extra tropicales (Garreaud, 2009). Jatunhuaycu, ubicada dentro de la cordillera oriental en los Andes del Ecuador, la

precipitación media anual varía entre 669,6 mm y 1.213 mm, con temperaturas diarias promedio entre 4°C y 7°C, y una presión atmosférica multianual promedio de 634,48 mbar; la humedad relativa es alta con una media de 86,9% (Torres, 2016). Según Pazmiño (2010), la precipitación en la zona del Antisana varía de 766,8 mm en páramo hasta 1090,0 mm en la zona del glaciar; el mes de abril indica una mayor precipitación media con 75 mm en el periodo 1995 a 1998.

Otros estudios indican que la precipitación media anual se encuentra alrededor de 700 mm (Black, 1982) a 759 mm (Alvarado, 2009). Sin embargo Buytaert *et al.*, (2007) y Buytaert *et al.*, (2006b) indicaron registros entre 700 mm a 3000 mm, para la región Andina del sur del Ecuador, con variaciones diferenciadas por sitio en relación a la altitud, topografía, pendiente y orientación.

En los Andes, las fluctuaciones de temperatura del aire se caracterizan por la presencia de los denominados piso térmicos, los cuales tienen una relación proporcional a la ubicación altitudinal a la que se encuentra un determinado sitio, evidenciándose disminuciones o aumentos de temperatura conforme varía el gradiente altitudinal. (Pabón *et al.,* 2001). La temperatura máxima dentro de la cuenca de Jatunhuaycu oscila entre 10 a 15 º C (Alvarado, 2009). Según Black (1982), citado por Yépez (2016), el clima presenta temperaturas que fluctúan desde -0 hasta los 12º a 18º C, considerándose húmedo, donde predominan: verano de marzo al mes de octubre e invierno de noviembre a febrero. Se caracteriza por su elevada radiación solar, con presencia frecuente de neblina, vientos de gran velocidad y precipitación en forma sólida, como nieve, granizo o líquida como agua. En la zona de Antisana es compleja la estimación teórica de valores de evapotranspiración (Alvarado, 2009), sin embargo el valor de la evapotranspiración referencial se encuentra en alrededor de 564,88 mm, equivalente a 237,25 mm de evapotranspiración real (Torres, 2016).

2.4 DIVERSIDAD FLORÍSTICA

De acuerdo a Dinerstein *et al*., (1995), el sector de Antisana tiene dos eco regiones, cuya prioridad de conservación a nivel regional se caracteriza como

máxima, siendo: en la cordillera Real Oriental los bosques montanos y del norte de los Andes, el páramo. Dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu, las familias vegetales con mayor frecuencia de especies fueron: Poaceae, Asteraceae y Apiaceae, siendo*, Elymus cordilleranus, Calamagrostis intermedia, Geranium multipartitum, Helogyne sp., Senecio aratum, Hypochaeris sp., Werneria nubigena y Uncinia sp.,* las especies más relevantes. (Aguirre N., J. Torres. 2013a).

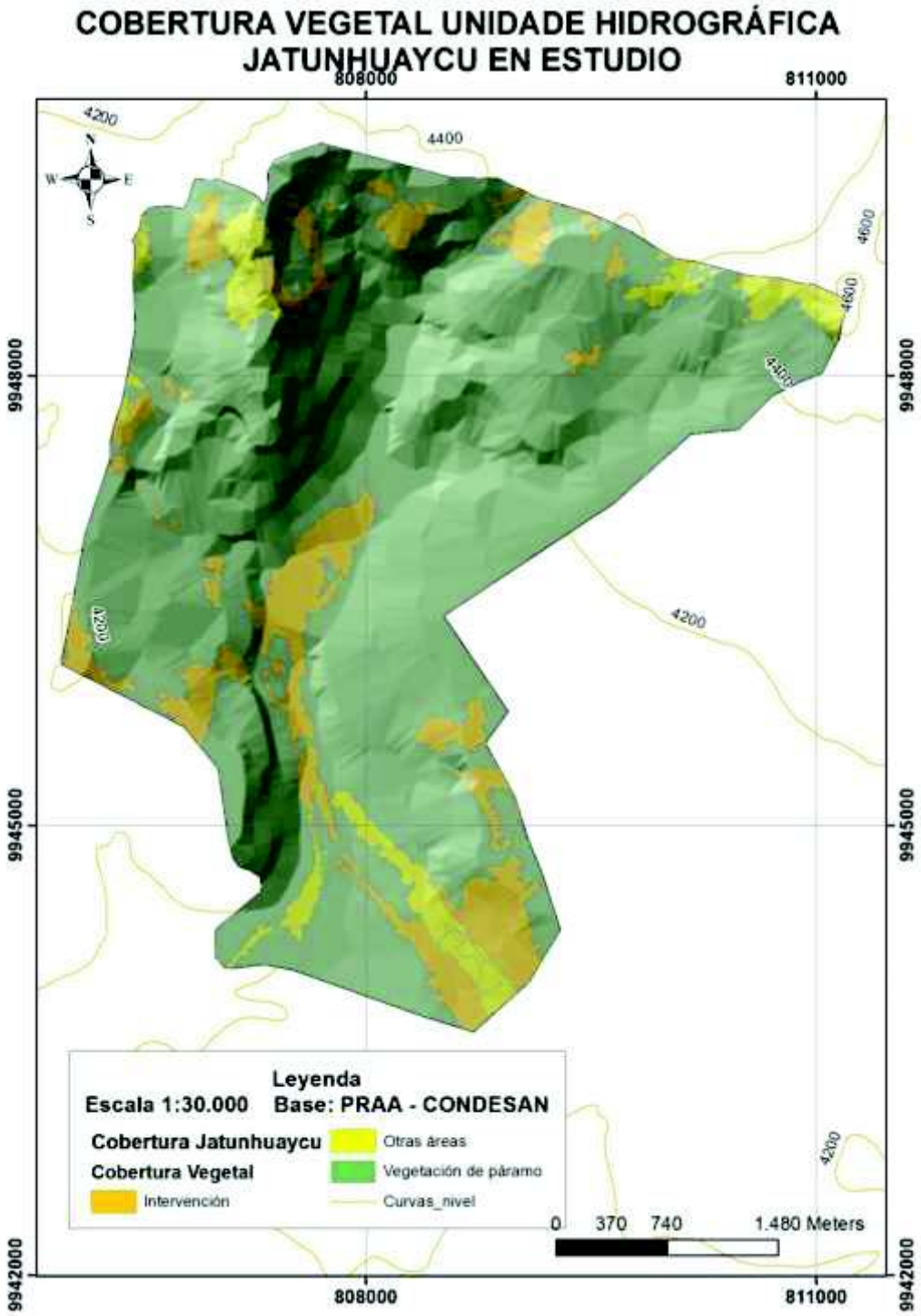
De acuerdo a PRAA & CONDESAN (2013) en el Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA), en la que se contiene la unidad de estudio, el mayor porcentaje de degradación lo presentó el nivel de degradación medio (54,1%), que incluían las coberturas de páramo de pajonal, arbustivo, arbustivo-almohadillas, mientras que el nivel muy alto de degradación fue el menor porcentaje. Dentro de estos resultados, las coberturas más degradadas fueron la de páramo del tipo pajonal, el páramo mixto praderizado y el páramo de almohadillas (2339, 1740,3 y 1623,8 hectáreas respectivamente (Tabla 2.1).

TABLA 2.1 Extensión coberturas vegetales y nivel degradación en el ACHA**.**

Nivel de degradación	**Porcentaje %**	**Tipo de vegetación**	**Área ha**
Muy alto	16,8	Poca vegetación - sin vegetación	178,70
		Sin vegetación	272,10
		Páramo praderizado	821,40
Alto	29,1	Páramo mixto praderizado	1740,30
		Páramo de almohadillas praderizado	452,60
Medio	54,1	Páramo de almohadillas	1623,80
		Páramo de pajonal	2339,00
		Páramo arbustivo - Páramo de almohadillas	75,30
		Páramo arbustivo	39,50
		Áreas anegadas	6,80
TOTAL	100,0		7549,50

De acuerdo a la figura 2.3, se muestra la distribución de la cobertura vegetal, identificándose alrrededor del 75 % de cobertura páramo.

FIGURA 2.3 Zonificación de la cobertura vegetal de la unidad experimental de estudio.



FUENTE: (PRAA & CONDESAN, 2013).

ELABORACIÓN: Autor

2.5 GEOLOGÍA

La geología del sitio de estudio forma parte de un diferenciado complejo basal volcánico (Barberi *et al.*, 1998). El estratovolcán Antisana está formado por lavas intercaladas con depósitos piroclásticos, lo que le confiere la cualidad de estrato volcán (Alvarado, 2009). La Formación Yacupamba constituye un acuífero generalizado en la zona de Antisana, dando origen a manantiales, esta formación geológica se aprecia en la cuenca Jatunhuaycu. Dicha formación corresponde a unidades que contienen mantos acuíferos de elevada transmisividad, multicapas de arenas permeables, flujos de lodo y aluviales (Alvarado, 2009). Algunas planicies, debido al drenaje impedido, se han transformado en zonas palustres – lacustres, esto ocurre alrededor de la laguna La Mica y en una parte del río Jatunhuaycu al margen derecho (Alvarado, 2009).

Según Antisana (2002) citado por Yépez (2016), la variedad topográfica y la complexidad de sustratos rocosos presentes en la zona, se relacionan directamente con la formación de la Cordillera de los Andes. Las rocas existentes datan desde el Paleozoico, mientras que las formaciones superficiales corresponden al reciente y actual Cuaternario. El relieve y la topografía, corresponden a diferentes condiciones morfoclimáticas, cuya variación corresponde a las de la clase nival, glaciar y peri glaciar. En la zona de estudio, en las partes central y norte, se evidencia la existencia de rocas metamórficas, compuestas de esquistos filitas, cuarcitas y gneises principalmente, las cuales se constituyen el armazón de la Cordillera.

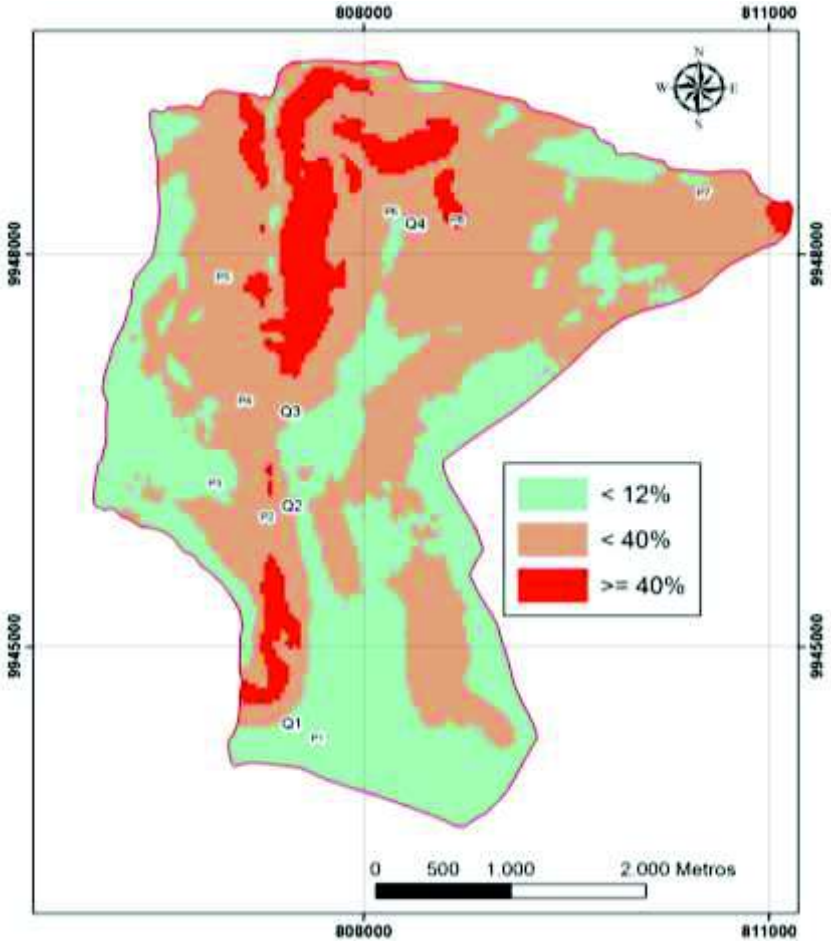
Así mismo, en la zona se indican rasgos geomorfológicos, los cuales se relacionan con eventos tectónicos y volcánicos, ocurridos durante la formación de la Cordillera Andina y procesos exógenos caracterizados como la erosión, colmatación y movimientos en masa, eventos que han favorecido la modelación de las rocas preexistentes (Antisana, 2002).

En la parte central y norte de la zona de estudio existen rocas metamórficas, compuestas por cuarcitas, esquistos filitas y génesis, rocas que son características de la estructura de la Cordillera de los Andes, zona en la que

predominan los rasgos geomorfológicos, que son el resultado de eventos tectónicos y de vulcanismo (Fundación Antisana et al., 2005; Ministerio del Ambiente, 2014; Soria, 2016; Yépez, 2016).

La geomorfología del sitio, a nivel general, se caracteriza por tener pendientes que van desde 12 y 40 %, existiendo pequeñas superficies con valores sobre el 40%. (Figura 2.4). Esta clasificación de la pendiente se relaciona con la distribución de cobertura vegetal existente en la zona (PRAA & CONDESAN, 2013).

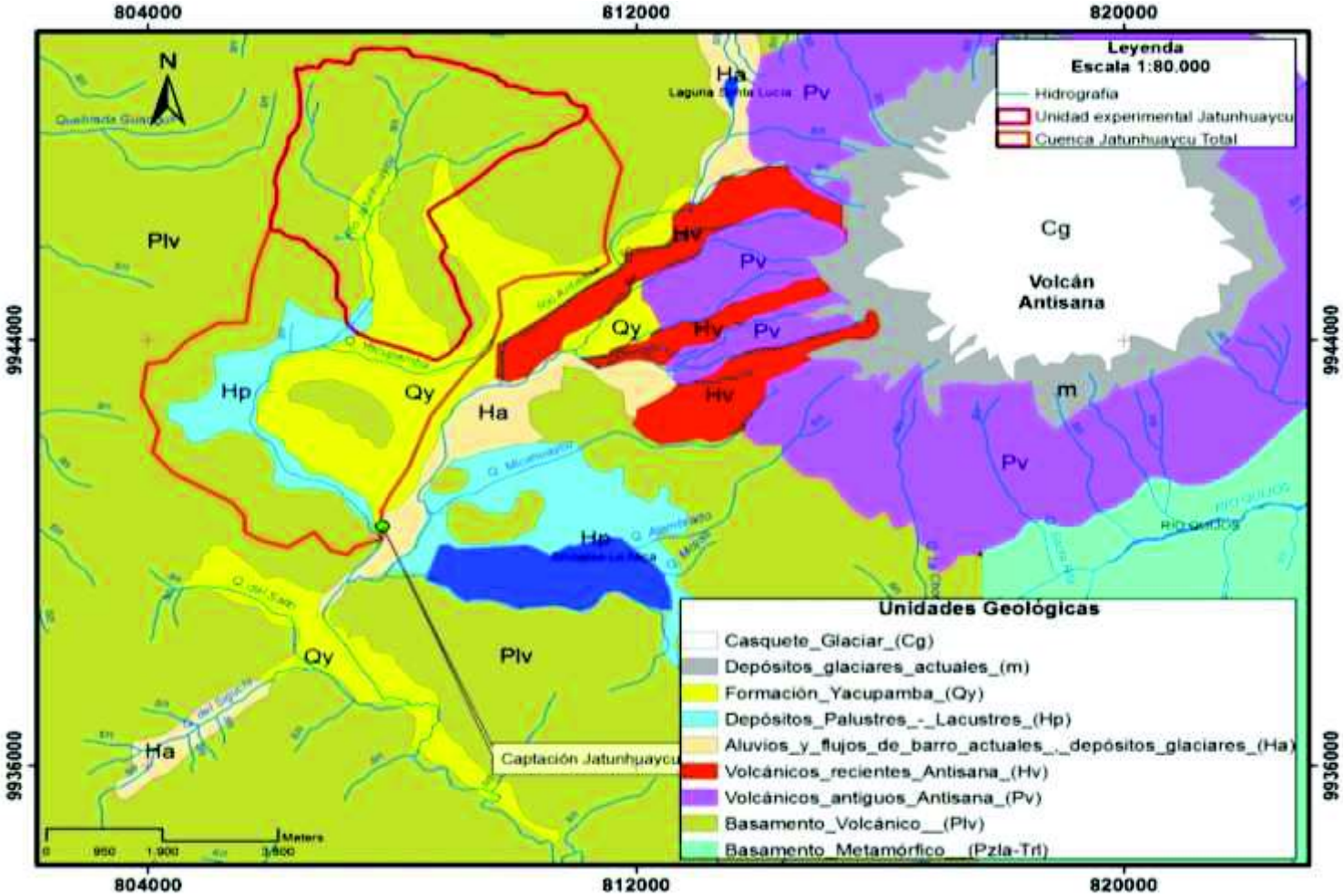
FIGURA 2.4 Mapa de Pendientes.



ELABORACIÓN: Autor

En las figuras 2.5. y 2.6., se observa la ubicación de la unidad experimental Jatunhuaycu, en base a la georeferenciación del mapa de Geología de Alvarado (2009) y al estudio del Ministerio de Energía y Minas de 1983 (G & I), respectivamente.

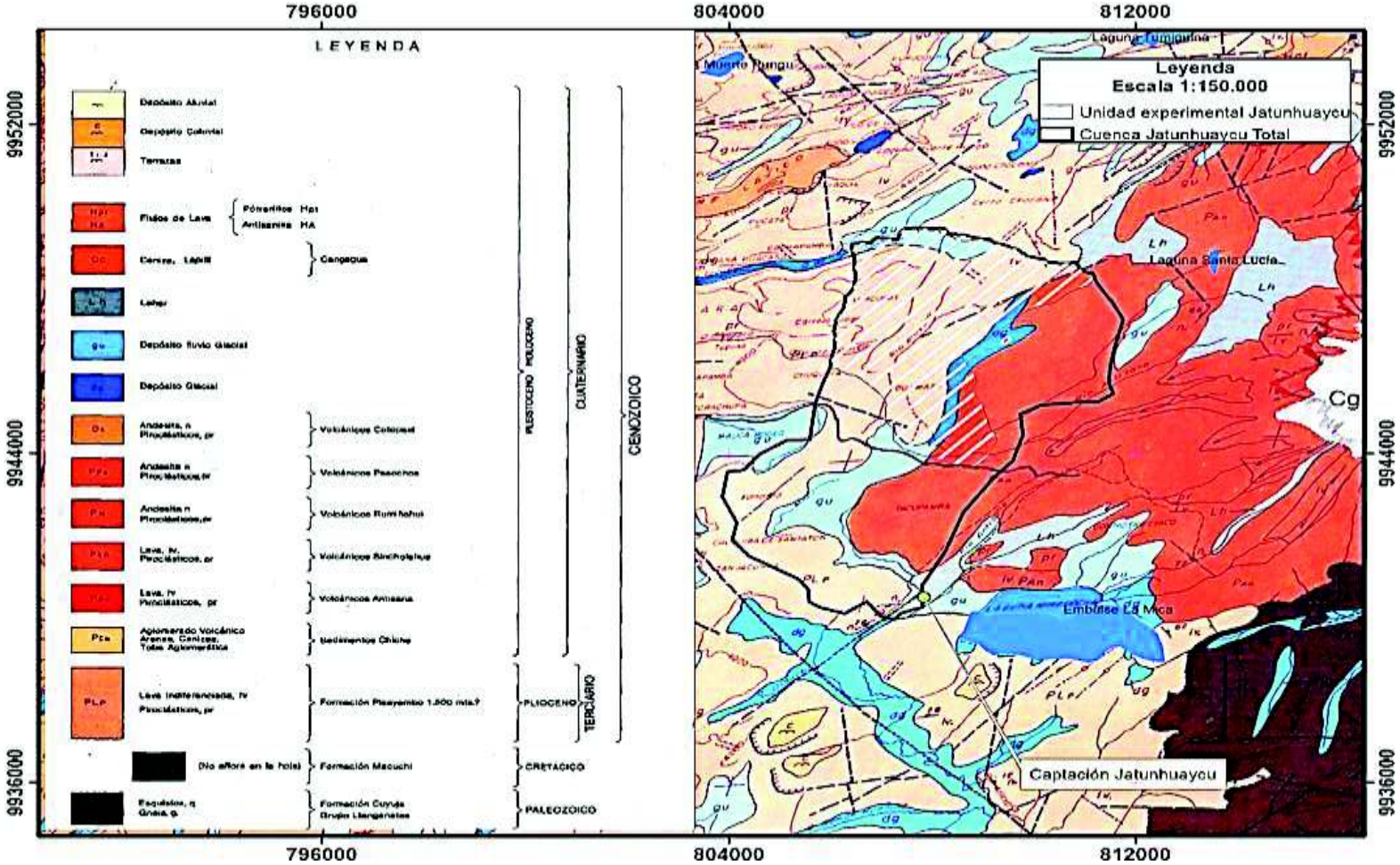
FIGURA 2.5 Geología de la unidad experimental Jatunhuaycu.



FUENTE: (Alvarado, 2009)

ELABORACIÓN: Autor

FIGURA 2.6 Levantamiento Geológico en el Antisana, zona de estudio Jatunhuaycu **(G & I)**.



FUENTE: Ministerio de Energía y Minas 1983.

Según Villares (2010) el sector de la quebrada Jatunhuaycu se encuentra al sur de la Unidad 18, dentro de la “Caldera Chacana”, específicamente en los Volcánicos Tabla Rumi “1”, esta estructura de origen volcánico, está conformada por un conjunto de flujos de lava que tienen un origen fisural, su ubicación está en la margen sur oeste de la “Caldera Chacana”. Así mismo este autor indica que las rocas de este conjunto se caracterizan por presentar un diaclasamiento de categoría intensa (fractura en las rocas, lajas), direccionadas en la margen oeste a N60E/46NW.

El relieve en el área de estudio se caracterizan por:

- **Piroclastos, brechas, flujos de lava:** Son relieves de forma de colina con diferente gradiente en altitud en los que se caracterizan los glaciares, zonas de valles, lagunas, humedales, picos rocosos conformados por piroplastos, brechas gruesas, conglomerados y flujos volcánicos; todos estos están ubicados en una edad que se estima pertenece a la formación geológica Pliocénica (Antisana, 2002).
- **Lahares:** este tipo de relieve presenta una forma ondulada con tendencia a colina baja, caracterizada por la presencia de flujos de lodo, en los que existen mezclas de cenizas, rocas, arenas, pómez, cuya pendiente varía de suave a moderada. Se estima que la edad de la formación geológica corresponde a Holoceno-Pleistocénica (Antisana, 2002).
- **Depósitos fluvio-glaciares:** en esta categoría los relieves de forma ondulada a colina baja están conformados por bloques de diferente composición, forma y tamaño, en los que se evidencia la presencia de arenas, barros; con pendientes suaves y de una distribución calificada como caótica (Antisana, 2002).

2.6 SUELOS

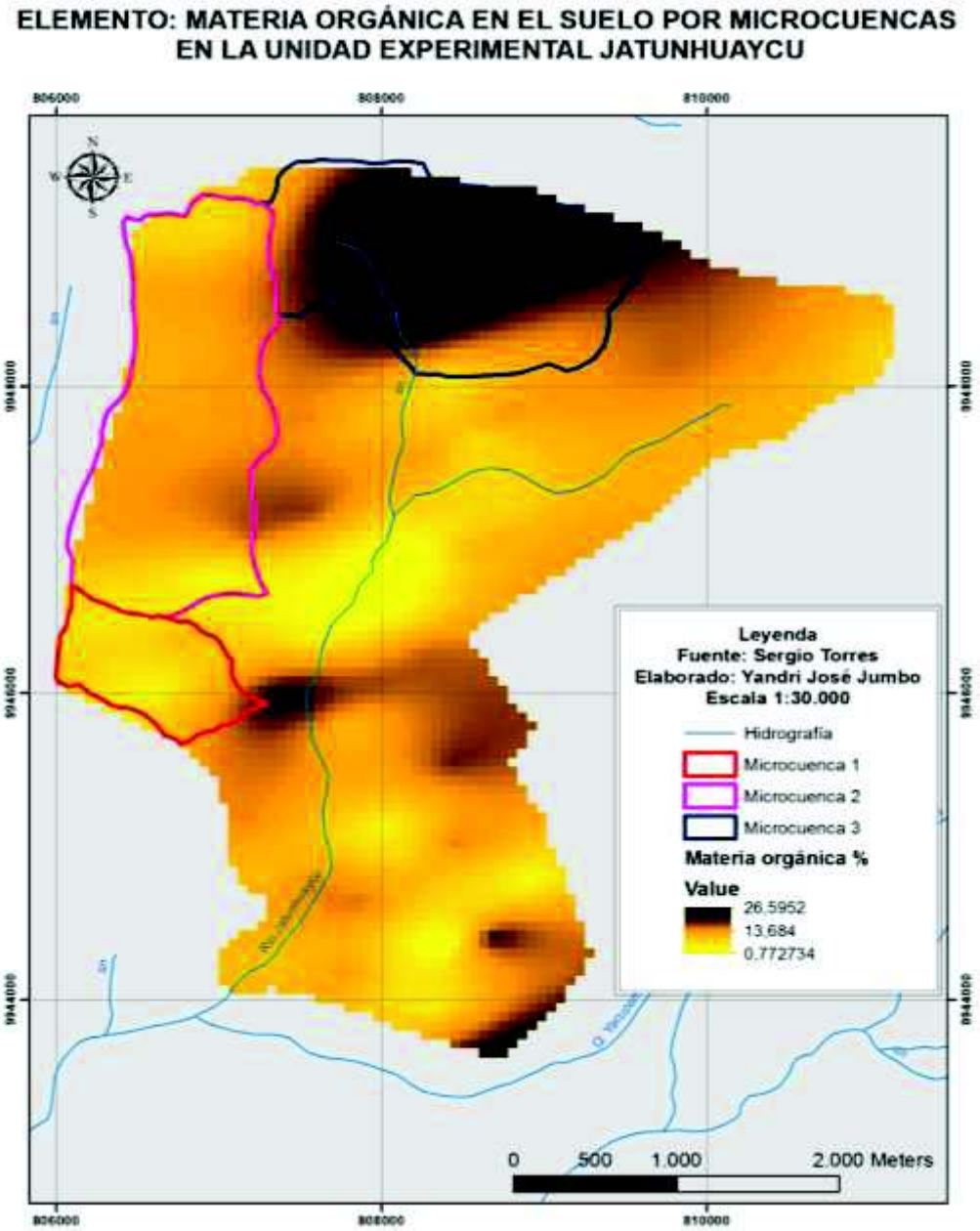
La zona del Antisana está caracterizada por sus cubiertas edáficas producto de la actividad volcánica de segunda generación, las cuales son clasificadas como cenizas conformadas por lapilli y arena de temporalidad reciente. Así mismo la influencia atmosférica ha desarrollado diferentes características en el suelo, afectando sus propiedades hidrofísicas como la porosidad, capacidad de

retención de humedad, así como cambios en los contenidos de materia orgánica y en su textura (Antisana, 2002). Los suelos de la cuenca generalmente son de origen volcánico y pertenecen al orden de Andisoles, con presencia de limos de color negro (Alvarado, 2009). El clima frío, la alta humedad, junto a las bajas temperaturas y presión atmosférica han provocado la acumulación de materia orgánica en diferentes horizontes del suelo, además que su geomorfología, unida a la baja actividad microbiana ayudan a la formación de suelos obscuros, ácidos, húmicos con alta estructura porosa y de excelente infiltración y capacidad de retención de agua (Buytaert *et al.,* 2006c). La textura de suelo corresponde a un suelo moderadamente grueso (Yépez, 2016). En promedio el porcentaje de arena corresponde a 44, 27 %, el de limo a 48,55 % y el de arcilla a un 7,18 % (Jumbo & Torres, 2016).

En cuanto a las propiedades químicas del suelo en la unidad experimental Jatunhuaycu existen valores de aluminio intercambiable desde 0.024 a 1.11 meq/100 ml; los valores de azufre se encuentran en un valor medio de 34.68 ppm, existiendo deficiencia en términos de este elemento en la parte media. El boro se encuentra entre 0,03 y 0,69 ppm, la mayor parte de la superficie analizada presenta valores calificados dentro del rango de muy bajo a moderadamente bajo. El cobre en la unidad de estudio presenta valores relativamente bajos de entre 1,17 a 14,23 ppm. La conductividad eléctrica presenta valores entre 0.61 a 9.61 dS/m, considerados en su mayoría como suelos no salinos. El fósforo tiene valores desde 2,42 a 68,15 ppm; el hierro, presenta valores entre 29,87 a 1978,89 ppm. En la Figura 2.7, se observan los diferentes contenidos de materia orgánica dentro de la unidad de estudio, la cual se encuentra entre 0,77 en zonas degradadas (principalmente arenales) a 26, 59 % en la zona conservada (JTU-M3), este elemento afecta la actividad microbiana en relación a la microflora y organismos de microfauna y además influye en el mejoramiento estructural del suelo, lo cual se relaciona con un mejoramiento de la regulación hídrica de acuerdo a las relaciones indicadas en la figura 2.11. El carbono orgánico está relacionado con los niveles y disponibilidad de nutrientes en el suelo; de acuerdo a los observado en la Figura 2.8, en las zonas de mayor degradación

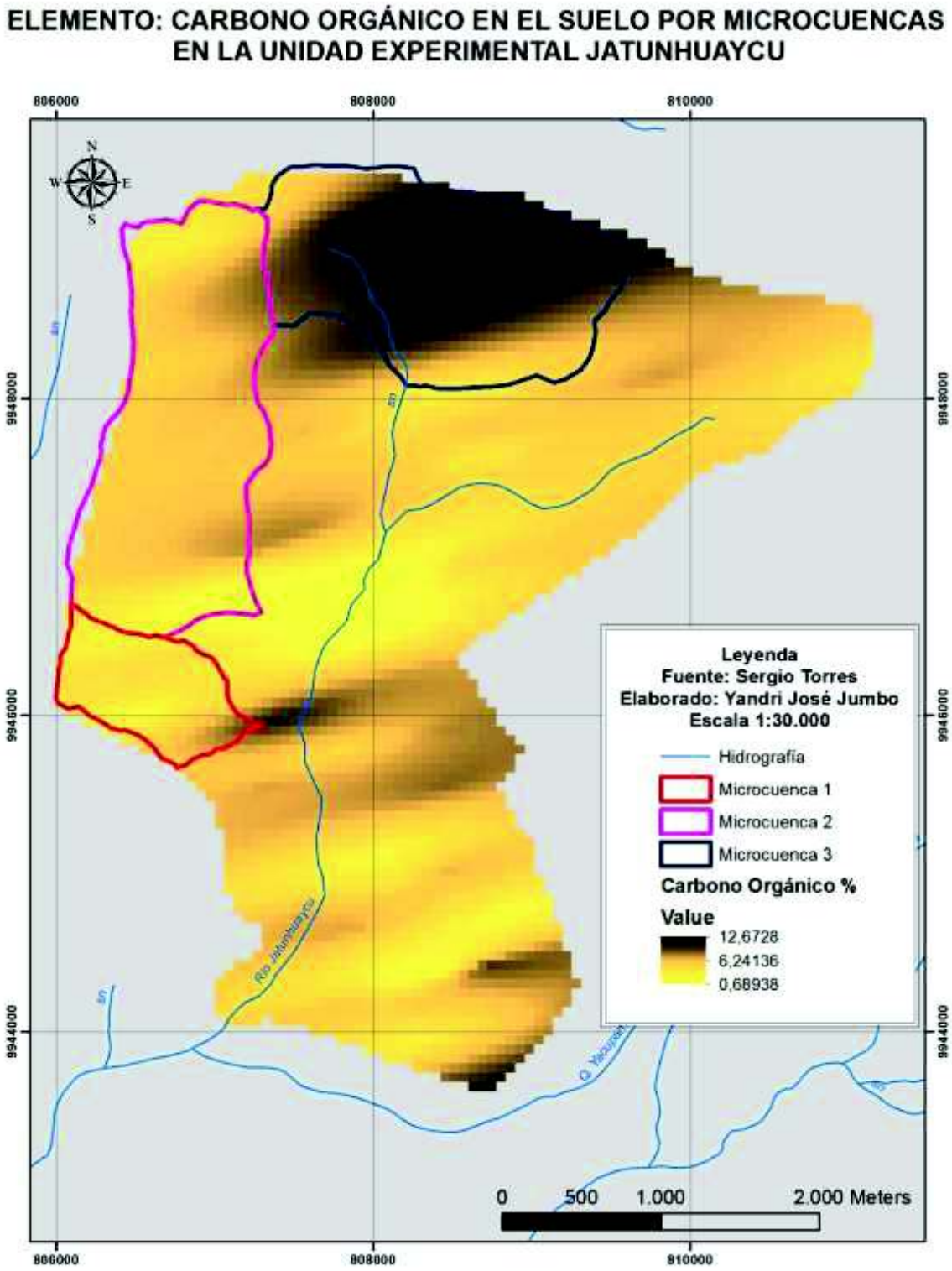
(principalmente arenales) tiene valores del 0,6 % y en las zonas de mejor cobertura vegetal (JTU-M3) presenta valores de 12,67 %, finalmente el PH dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu, clasifican a los suelos como ácidos muy fuertes con valor de 4,65 a neutro con valor de 6,65 (Jumbo & Torres, 2016).

FIGURA 2.7 Contenidos de materia orgánica en la unidad en estudio.



FUENTE: (Jumbo & Torres, 2016)

FIGURA 2.8 Contenidos de carbono orgánico en la unidad en estudio.



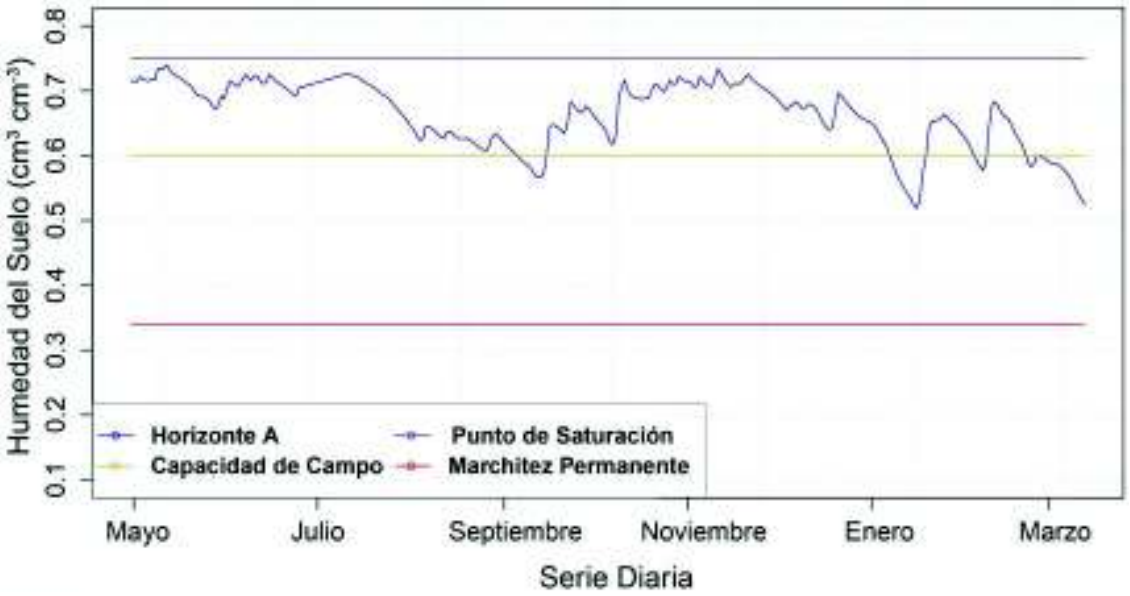
FUENTE: (Jumbo & Torres, 2016)

2.7 HUMEDAD DEL SUELO

La humedad del suelo de la zona de estudio fue caracterizada en el estudio realizado por Torres (2016) sobre los “Parámetros de control de la Dinámica Hidrológica del Páramo en Antisana”, en base al registro de la estación H1 (figura 2.1) que cuenta con los TDR Time Domain Reflectometer (Jones *et al.,* 2012) ubicados en una calicata en la parte media de la unidad experimental en estudio, con sensores bimetálicos colocados en forma horizontal en el horizonte superficial (A) a una profundidad de 10 cm y en el horizonte 2Ab a 70 cm, asociados a un datalogger marca Campbell Scientific Cr-200X, el cual registra información del contenido de agua del suelo con una resolución de 5 minutos.

La humedad del suelo en el horizonte superficial A, muestra un comportamiento muy dinámico inclusive mayor que el horizonte 2Ab, debido al impacto de las frecuente lluvias, a la evapotranspiración y al alto contenido de raíces en los primeros centímetros de suelo que generan flujos preferenciales (Blume *et al.,* 2007; Hofstede, 1995; Buytaert *et al.,* 2006d) citados por Torres (2016). En el mismo estudio, de los 304 días monitoreados (iniciando el 12/05/2014), se observó que en la mayor parte del periodo, 85 % de datos diarios, los registros estuvieron sobre capacidad de campo (Figura 2.9) Si se considera la profundidad del horizonte A (21.3 cm), su potencial de almacenamiento sería de 108.6 mm a 156.5 mm. De acuerdo con estos resultados, el horizonte superficial presenta gran capacidad de retención de agua, caracterizado por su fuerte estructura, alta porosidad (72.4 %), baja densidad aparente (0.64 Mg m-3) y alto contenido de materia orgánica (11.9%) típico de los Andisoles (Nanzyo *et al.,* 1993; Buytaert *et al.,* 2007b).

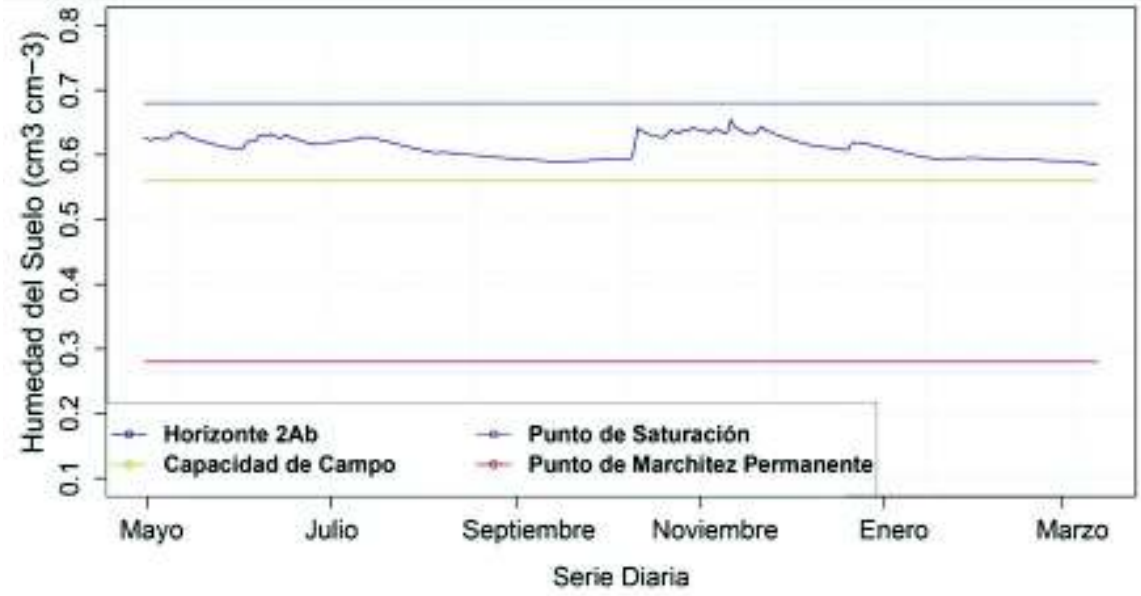
FIGURA 2.9 Dinámica diaria de la humedad del suelo en el horizonte A de acuerdo a los datos de TDR en la parte media de la unidad experimental de estudio.



ELABORACIÓN: Autor

Así mismo se observó que los patrones de respuesta en la humedad del horizonte en eventos extremos mayores a 5.8 mm con alta y extrema duración e intensidades de 1.32 mm h^{-1} a 4.5 mm h^{-1} generaron variación en el sensor de humedad del suelo ubicado en el horizonte 2Ab, caracterizados por una humedad inicial promedio, mayor a la capacidad de campo (0.56 cm^3 cm^{-3}), cercano a punto de saturación (0.68 cm^3 cm^{-3}). El movimiento de agua hacia el horizonte 2Ab se da principalmente por la diferencia de humedad en el suelo, permitiendo un flujo vertical desde el horizonte superficial A, caracterizado por una alta conductividad hidráulica (0.51 mm h^{-1}), alto contenido de materia orgánica (11.9%), alta capacidad de regulación hídrica (Torres, 2016), en relación a la distribución de la mayoría de datos entre el punto de saturación, capacidad de campo y presencia de raíces que generan flujos preferenciales (Buytaert *et al.* 2007c).

FIGURA 2.10 Dinámica diaria de la humedad del suelo en el horizonte 2Ab de acuerdo a los datos de TDR en la parte media de la unidad experimental de estudio.



ELABORACIÓN: Autor

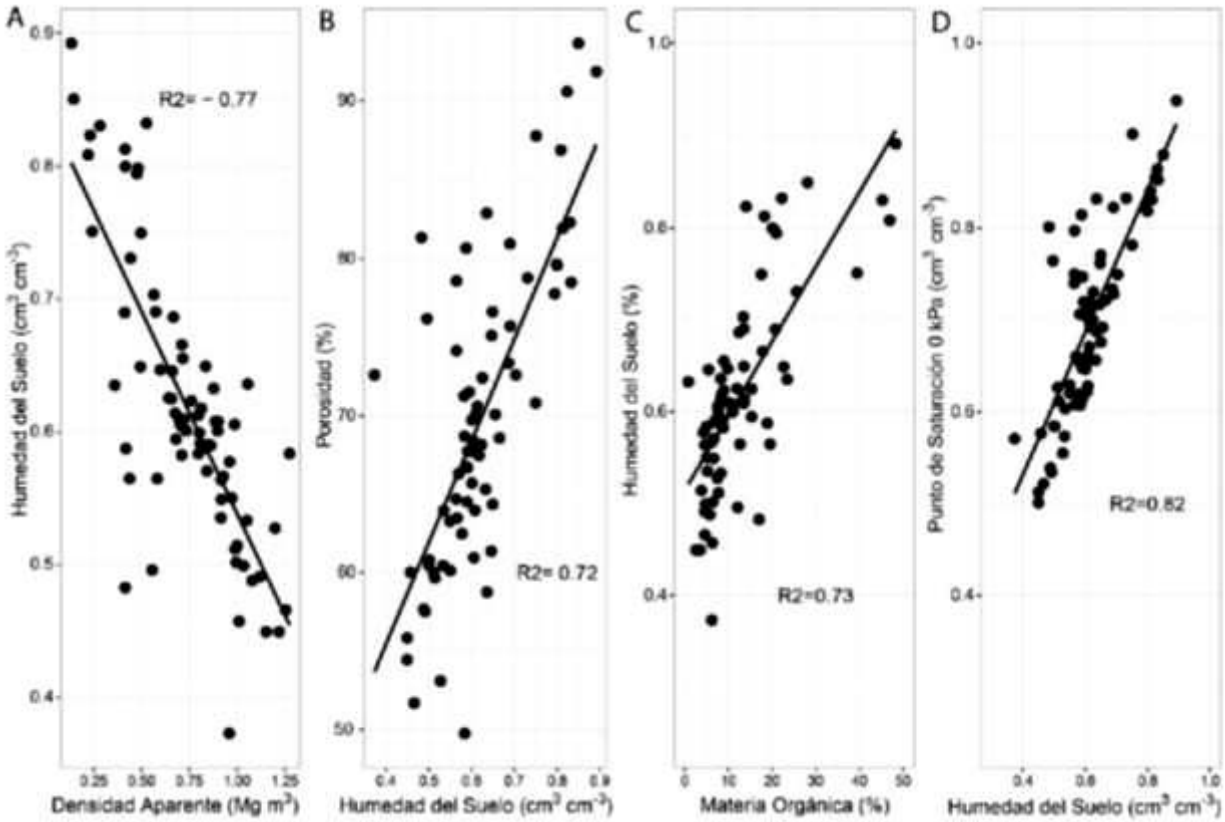
La dinámica del horizonte 2Ab es más estable en valores entre capacidad de campo (0.56 $cm^3\ cm^{-3}$) y punto de saturación (0.68 $cm^3\ cm^{-3}$) de acuerdo a los resultados observados (Figura 2.10), con un pico máximo en el mes de noviembre de 0.65 $cm^3\ cm^{-3}$. El punto más bajo de la curva de humedad del suelo diaria se presentó en el mes de marzo con 0.58 $cm^3\ cm^{-3}$, dato superior al encontrado en el pico más bajo del horizonte superficial A (0.51 $cm^3\ cm^{-3}$). El alto contenido de agua en el horizonte 2Ab se debe principalmente a la baja densidad aparente con 0.70 $Mg\ m^{-3}$, alta porosidad de 68.36% y alto contenido de materia orgánica con 5.8% (Nanzyo et al. 1993; Buytaert et al. 2007b); que permite una capacidad de almacenamiento entre 365.4 mm y 326.43 mm al considerar una profundidad del horizonte 2Ab de 55.8 cm (Torres, 2016).

2.8 RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DEL SUELO Y LA HUMEDAD DEL SUELO

Los resultados de la humedad del suelo en 28 puntos muestreados (calicatas), dentro de la JTU-M2, mostraron la alta capacidad de almacenamiento de los suelos de páramo, que incorporan paulatinamente agua especialmente durante

los periodos de estiaje (Torres, 2016), permitiendo un suplemento del recurso hídrico continuo para las comunidades Andinas de las cuencas medias y bajas (Buytaert *et al.* 2006b; Hincapié &Tobón, 2012; Hofstede *et al.* 2003).

FIGURA 2.11 Correlación entre la densidad aparente, porosidad, materia orgánica y punto de saturación con la humedad del suelo.



FUENTE: (Torres, 2016)

En la figura 2.11, se observa los patrones lineales (directos e inversos) significativos del comportamiento de la humedad del suelo, obtenidos por Torres (2016), en base a 28 sitios muestreados en la JTU-M2, específicamente con la densidad aparente (r^2 = - 0.77, $p < 0.0001$, Figura 2.11A; porosidad (r^2 = 0.72, $p < 0.0001$, Figura 2.11B), materia orgánica (r^2 = 0.73, $p < 0.0001$, Figura 2.11C) y punto de saturación volumétrico (r^2 = 0.82, $p < 0.0001$, Figura 2.11D), permitiendo de esta manera corroborar el rol fundamental que desempeñan las propiedades hidrofísicas y químicas del suelo en la retención y regulación de agua y en la

respuesta hidrológica a nivel de cuenca. (Buytaert, 2004); (Buytaert *et al.* 2007c) citado por Torres (2016).

Resumen del capítulo

La unidad experimental de estudio pertenece a la cuenca del río Antisana, tiene una superficie aproximada de 15,86 km^2, su gradiente altitudinal varía de 4000 a 4615 msnm, su caudal aporta con el 17,6 % al sistema de 1700 l/s. de agua potable de "La Mica Quito Sur". Así mismo tiene un drenaje pobre, de baja sinuosidad, considerado como un río con alineamiento "recto". Dentro de la unidad experimental se ubican las microcuencas anidadas para el estudio, JTU-M1, JTU-M2 y JTU-M3 con superficies de 0,70; 2,51; y 2,34 km^2, respectivamente. El caudal medio anual de escorrentía de la cuenca experimental Jatunhuaycu es de 180 l/s, y su caudal específico corresponde a 8,06 $l/s/Km^2$ (Alvarado, 2009). El coeficiente de escurrimiento varía de 0,28 según Ochoa *et al.,* (2016) a (+) 0,347 según Andrade, (1996). La lámina anual de precipitación se encuentra en alrededor de 700 mm (Black, 1982) a 759 mm (Alvarado, 2009). La temperatura máxima dentro de la cuenca de Jatunhuaycu oscila entre 10 a 15 º C (Alvarado, 2009). La cobertura vegetal relevante corresponde a páramo con diferentes estados de degradación. La geología de la unidad de estudio se caracteriza por la Formación Yacupamba, considerada como un acuífero generalizado en toda la zona de Antisana. El relieve observado en la zona de estudio se caracteriza por la presencia de lahares, piroclastos, flujos de lava, brechas y depósitos fluvio-glaciares. La formación de los suelos en la zona del Antisana tiene un origen volcánico y estos pertenecen al orden de Andisoles, con presencia de limos de color negro (Alvarado, 2009). La materia orgánica dentro de la unidad de estudio varía entre 0,77 en zonas degradadas (principalmente arenales) a 26, 59 % en la zona conservada (JTU-M3), esta propiedad tiene relación directa con la humedad en el suelo con un ($r^2 = 0.73$, $p < 0.0001$) según Torres (2016).

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Este capítulo describe los diferentes métodos utilizados para obtener los datos necesarios en la corrida del modelo GR4J en la unidad experimental de estudio y sus tres microcuencas anidadas, iniciando con la georreferenciación del *divortium aquarum* para la restitución cartográfica de los límites de la unidad hidrográfica, posteriormente se realizó relleno de datos de precipitación y estimación de temperatura para obtener la evapotranspiración del sitio, esto debido a la falta de equipos de registro en las estaciones ubicadas dentro de la misma. Los datos de caudal se evalúan en base al coeficiente de gasto en relación a la geometría de los vertederos. El balance hidrológico se evalúa en base a su ecuación general y en relación al intercambio de aguas subterráneas IGF obtenido por el modelo.

3.1 ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS

3.1.1 Información Cartográfica Disponible

La información cartográfica correspondió a la base del Instituto Geográfico Militar IGM para la zona del Antisana a una escala 1:50.000 en formato shape (.shp), principalmente de curvas de nivel e información hidrográfica. Así mismo se contó con información del Proyecto Regional Andino de Adaptación al Cambio Climático / Adaptación al impacto del retroceso acelerado de glaciares en los andes tropicales PRAA, en cuanto a una imagen ALOS (Advanced Land Observing Satellite) 2007, capturadas por el satélite Japonés ALOS; de este ente además se contó con la base de los estados de degradación en la unidad experimental Jatunhuaycu en formato shape. Finalmente el Fondo de Protección del Agua FONAG facilitó el shape de la división de las unidades hidrográficas en la cuenca del Guayllabamba Alta y su ámbito de acción.

3.1.2 Equipos y Serie Disponible

El Fondo de Protección del agua FONAG cuenta con una red de monitoreo en la cuenca Jatunhuaycu que contempló la instalación de ocho pluviómetros a

diferente altitud (Tabla 3.1 y figura 2.1), de marca TEXAS TE525MM, de cubeta electrónica basculante, con resolución de 0.1 mm asociados a datalogger Campbell Scientific Cr-200X, colocados a 1.50 metros sobre el nivel del suelo, tanto en la parte baja y alta de la unidad hidrográfica Jatunhuaycu mostrada en la figura 2.1. Para el registro y medición del caudal se construyó cuatro vertederos de pared delgada de sección combinada triangular y rectangular. Que poseen una sonda de nivel automática Instrumentación Northwest INW marca PT2X, que acumula información cada 5 minutos con una precisión ± 0.06 %; estas sondas realizan automáticamente la corrección barométrica. Para transformar los datos de nivel a caudal se utiliza las ecuaciones estándares para la infraestructura hidráulica (Sotelo, 1989), en función de la carga hidráulica (Torres, 2016). Al momento no se ha elaborado la curva de descarga por parte de FONAG.

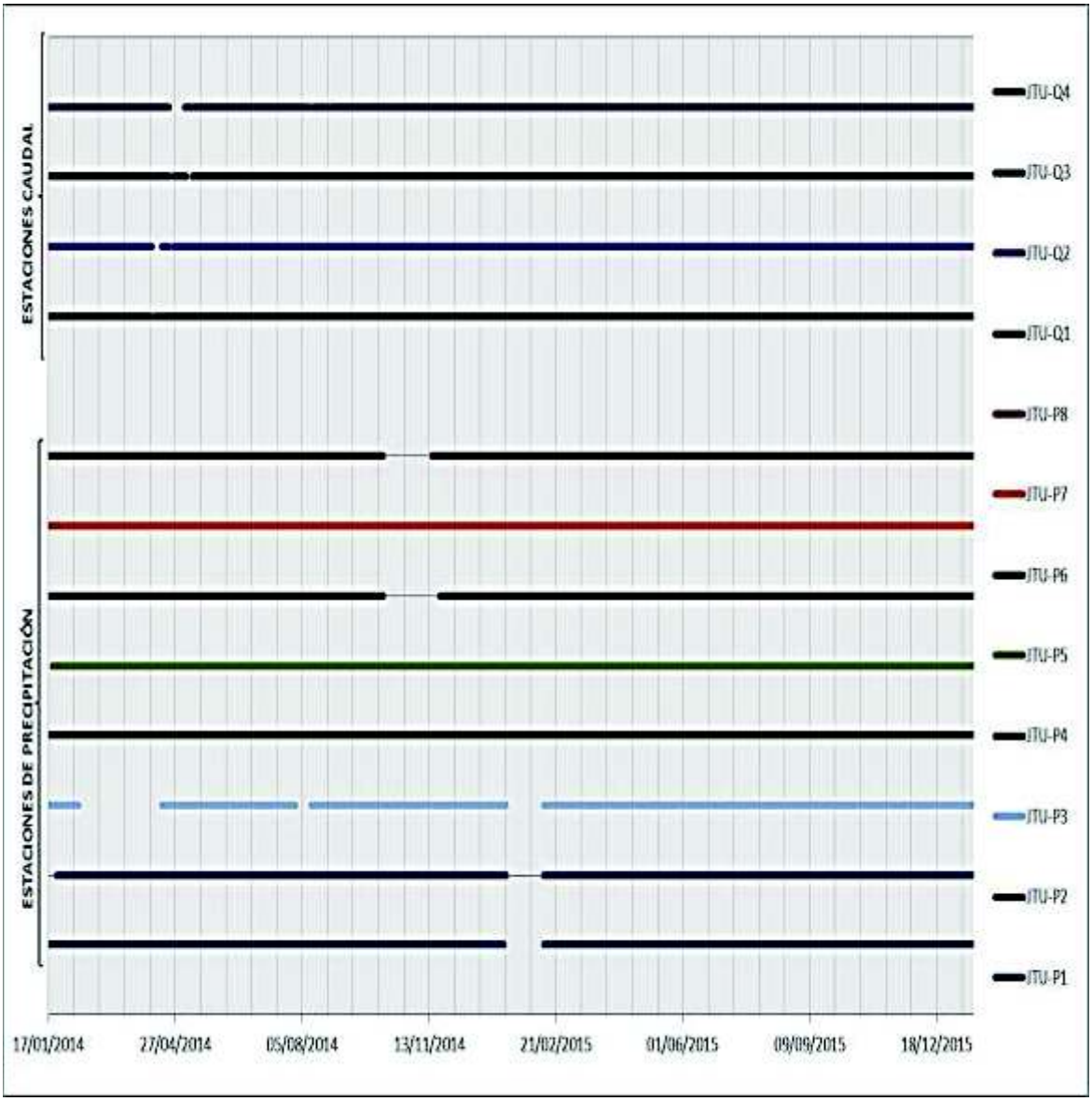
Así mismo se trabajó con los datos de la estación Humboldt (M5034), del tipo Meteorológica Automática Campbell, con sensor de temperatura y humedad marca Vaisala, modelo HMP45AC, Anemómetro marca Young, modelo 05103-5: De esta estación se utilizó el registro de las variables de viento, humedad relativa y temperatura, para el cálculo de la evapotranspiración; la precipitación de esta estación se usó junto con las ocho anteriores, en la determinación de la precipitación de toda la cuenca Jatunhuaycu (Figura 4.11) Para la evaluación de la temperatura dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu, se trabajó con los datos diarios de trece estaciones de FONAG, ubicadas dentro de la cordillera Oriental de la cuenca alta del Guayllabamba en referencia al rango altitudinal de la unidad de estudio, estas estaciones son descritas a mayor detalle en el subcapítulo 3.2.3.

TABLA 3.1 Referencia altitudinal de las ocho estaciones pluviométricas dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu.

Estación	Código	Altitud msnm
P1	JTU_01_PT_11	4023
P2	JTU_01_PT_22	4104
P3	JTU_01_PT_32	4148
P4	JTU_01_PT_43	4110
P5	JTU_01_PT_53	4271

P6	JTU_01_PT_63	4203
P7	JTU_01_PT_73	4231
P8	JTU_01_PT_83	4289

FIGURA 3.1 Serie de datos diarios usados en la modelación con el GR4J para en la evaluación hidrológica de la unidad Jatunhuaycu.



ELABORADO: Autor

En la figura 3.1 se muestra gráficamente la serie de datos diarios disponibles por cada estación, tanto en precipitación (5590 datos) como caudal (2890 datos), en

las que existe un vacío del 4,28 % para datos de precipitación y 1,03 % en los datos de caudal.

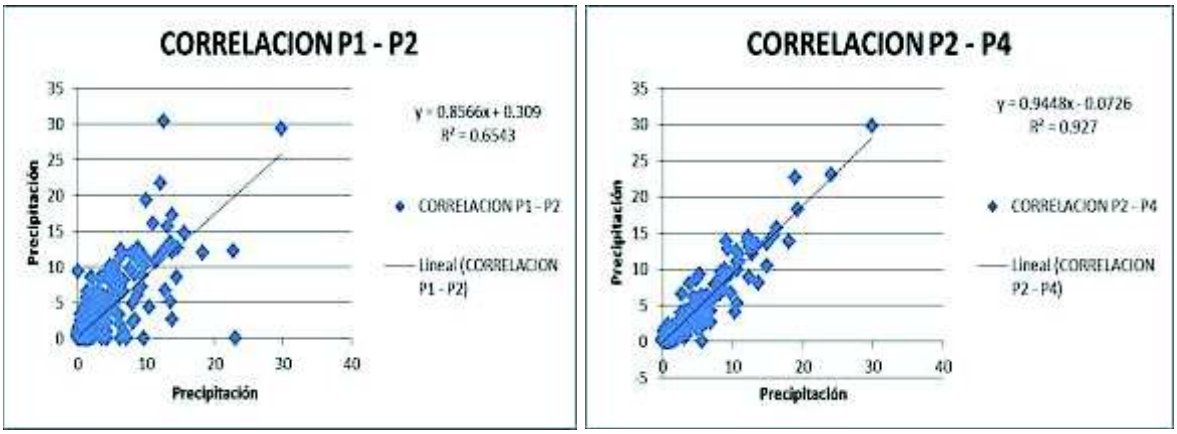
3.1.3 Relleno de Datos

Para el relleno de datos diarios de precipitación se utilizó el coeficiente de Determinación R^2 (Pita & Pértega, 2017) en el que se usó todas las estaciones dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu.

TABLA 3.2 Coeficiente de determinación R^2 entre las diferentes estaciones pluviométricas de Jatunhuaycu.

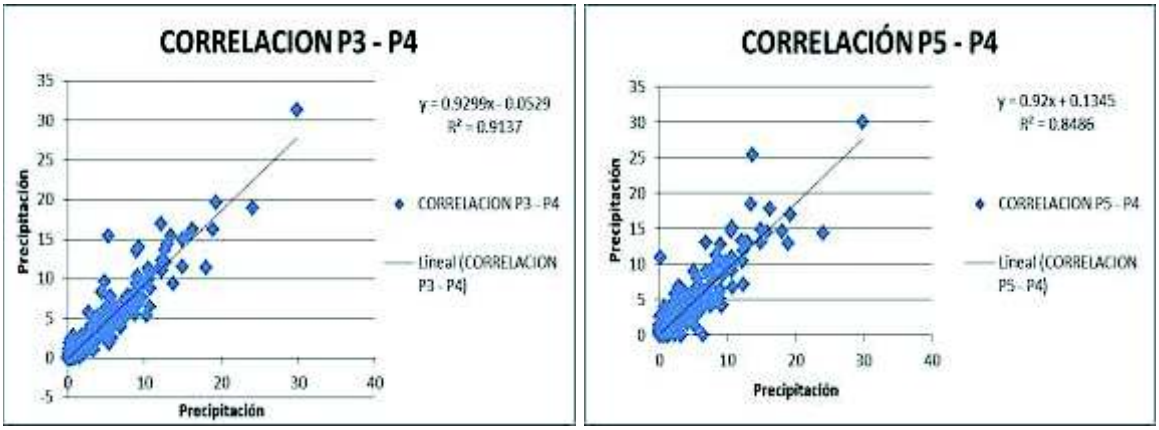
	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	0.65	0.63	0.61	0.51	0.51	0.50	0.47
P2	1.00	0.94	0.93	0.74	0.65	0.59	0.52
P3	0.94	1.00	0.91	0.77	0.64	0.57	0.51
P4	0.93	0.91	1.00	0.85	0.73	0.66	0.58
P5	0.74	0.77	0.85	1.00	0.77	0.69	0.58
P6	0.65	0.64	0.73	0.77	1.00	0.96	0.87
P7	0.59	0.57	0.66	0.69	0.96	1.00	0.92
P8	0.52	0.51	0.58	0.58	0.87	0.92	1.00

FIGURA 3.2 Tendencia y ecuación de relleno de datos para P1 y P2**.**



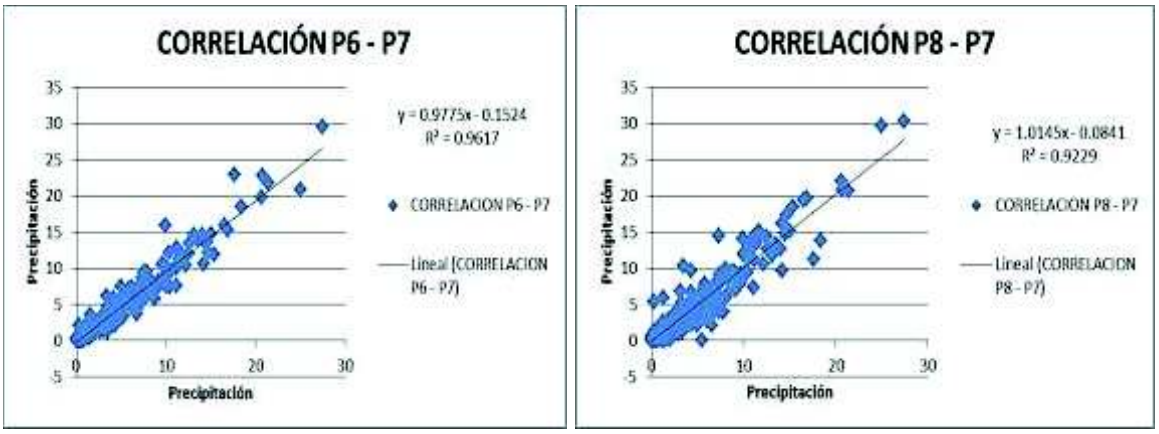
ELABORACIÓN: Autor

FIGURA 3.3 Tendencia y ecuación de relleno de datos para P3 y P5.



ELABORACIÓN: Autor

FIGURA 3.4 Tendencia y ecuación de relleno de datos para P6 y P8.



ELABORACIÓN: Autor

En las variables de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura, no se realizó relleno de datos, las series disponible estuvieron completas.

3.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación hidrológica se desarrolla con el objeto de simular los procesos relacionados con el balance de cuencas hidrográficas en los que sus entradas como la precipitación, y salidas como la evapotranspiración, son la base en la generación y representación de caudales. Hoy en día, el avance tecnológico ha permitido el desarrollo de muchos modelos en los que el conocimiento y

entendimiento de los usuarios es clave en la generación de información y su contraste con la realidad (Jorquera *et al.,* 2011).

La simulación es una herramienta muy importante en la generación de conocimiento, erigiéndose como el complemento de la teoría y experimentación. Para la simulación de los caudales de la unidad experimental Jatunhuaycu, se usará un modelo conceptual, el cual simula la realidad mediante la articulación de conceptos, a manera de hipótesis. De acuerdo a la problemática hidrológica planteada se deberá realizar la selección cuidadosa del modelo conceptual, en el que mediante la simulación espacial y temporal, se contribuya a la generación de conocimiento validado, en relación de la solución de la problemática planteada. Con la información disponible de observaciones y mediciones de la realidad, se va verificando la coherencia del modelo y de sus resultados, teniendo en cuenta para ello, las limitaciones de la información, la cantidad y calidad de observaciones, además de su precisión e incertidumbre (Vélez, 2013).

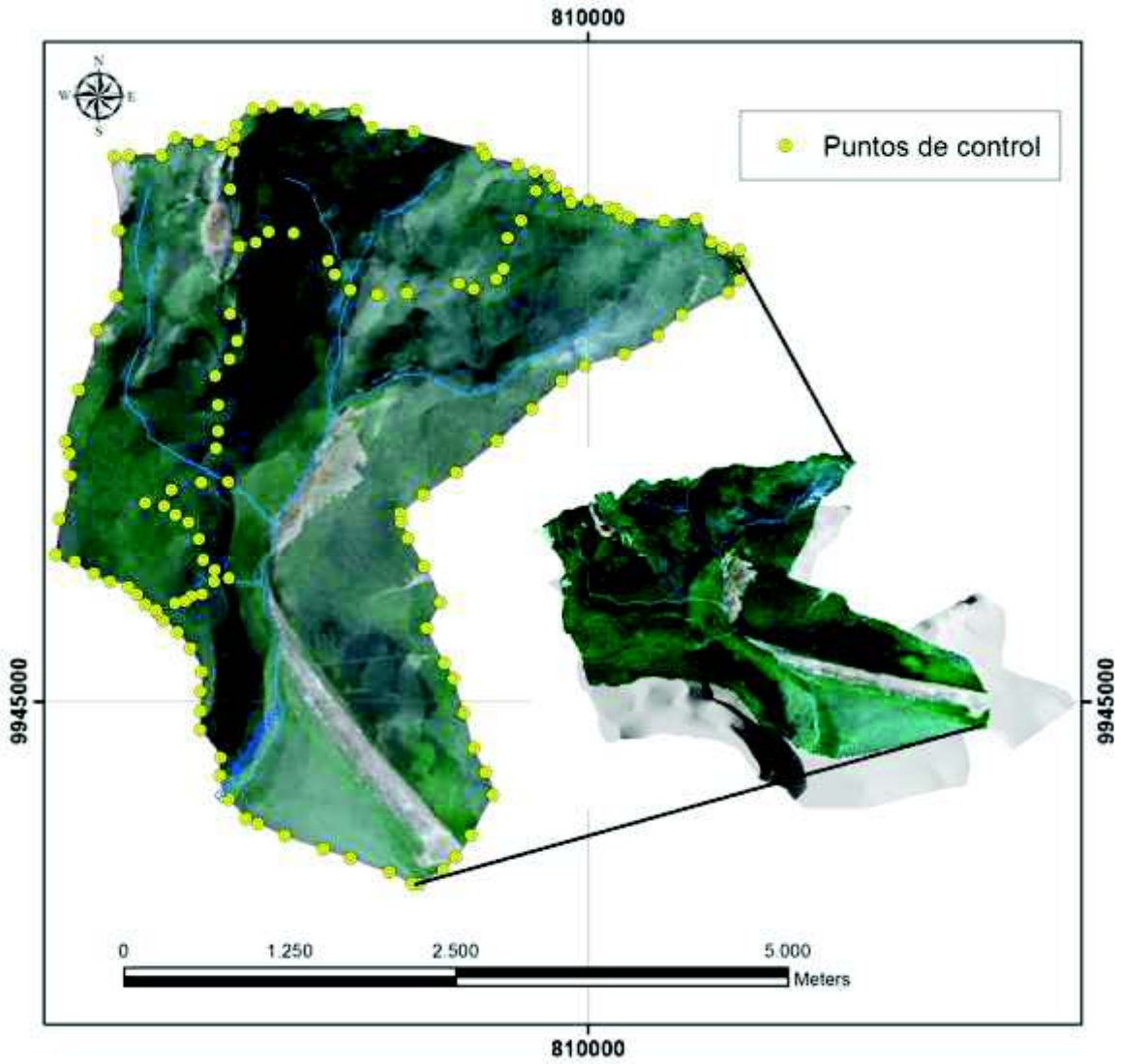
Otro tipo de modelación corresponde a la modelación hidrológica, la cual se enfoca preferentemente en los procesos hidrológicos superficiales, se cuenta con modelos como MIKE-SHE, ANSWERS (eventos y continuo), TOPMODEL, ATHYS, TREX, AQUA y JAMS. Las principales diferencias son la discretización espacial de la cuenca, la simulación continua o de eventos aislados y el enfoque utilizado para la representación de los procesos dominantes. (Jorquera *et al.,* 2011).

En los dos casos la problemática planteada permitirá al especialista, la selección del modelo adecuado a la situación, identificando sus potencialidades y limitaciones en relación al tipo y disponibilidad de datos para la obtención de los resultados deseados (Jorquera *et al.,* 2011). El modelo GR4J es un modelo de paso de tiempo diario, el cual utiliza datos de precipitación, evapotranspiración y caudal. El modelo mediante el uso de cuatro parámetros obtiene las mejores simulaciones de caudales en las que la calibración no está sujeta al número de parámetros (Carvajal & Roldan, 2007).

3.2.1 Restitución Cartográfica

Con el objeto de contar con una mejor aproximación de la superficie real de la unidad experimental de estudio y sus microcuencas, se realizó la corrección de sus límite naturales, tomándose puntos de control en campo con ayuda del GPS Garmin, modelo e*trex* 30, con error de precisión de hasta 3 metros. Posteriormente se realizó la validación mediante el uso del software ArcMap 10.1 y ArcScene 10.1., con la elaboración de un modelo de elevación digital del terreno.

FIGURA 3.5 Imagen 3D de la corrección del límite de la unidad de estudio



ELABORACIÓN: Autor

En la figura 3.5 se observa la restitución cartográfica en formato 3D, en la que mediante el traslape de un modelo de elevación digital (DEM) y la imagen satelital, se puede apreciar a mejor detalle el relieve de la unidad de estudio y comparar con los 137 puntos de control tomados en campo.

3.2.2 Precipitación Media

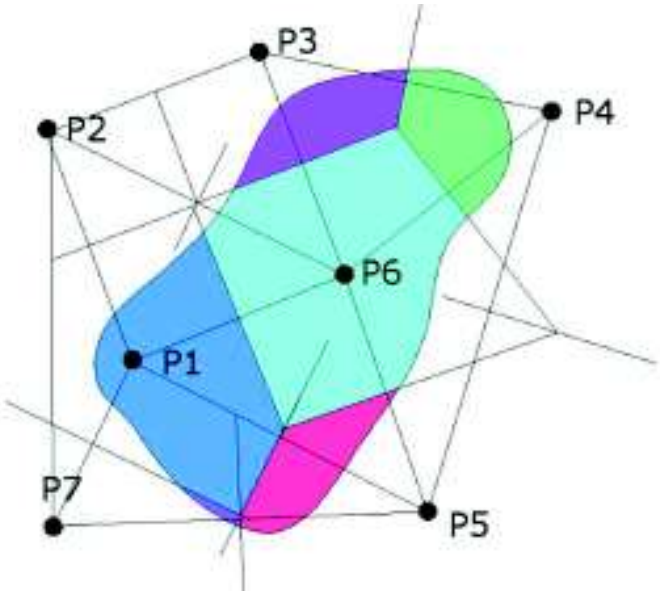
Con los datos facilitados por el FONAG de las estaciones pluviométricas y de caudal de la unidad experimental Jatunhuaycu, se procedió a realizar el procesamiento de datos a una escala diaria, puesto que los datos originales estaban generados en un lapso de tiempo de cada cinco minutos.

Para el cálculo de la precipitación media diaria se trabajó con el software ArcMap 10.1, usando el método de los polígonos de Thiessen, el cual evalúa la lluvia sobre un área determinada mediante el uso de la posición relativa de los pluviómetros respecto del área (Bateman, 2007) según lo indicado en la ecuación (1).

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Pi\ ai}{\sum Ai} \quad (1)$$

Donde $\bar{P}$ es la precipitación media, *Pi* es la precipitación de cada estación contenida en un polígono, *ai* son las áreas parciales de cada polígono y *Ai* es el área total de la cuenca.

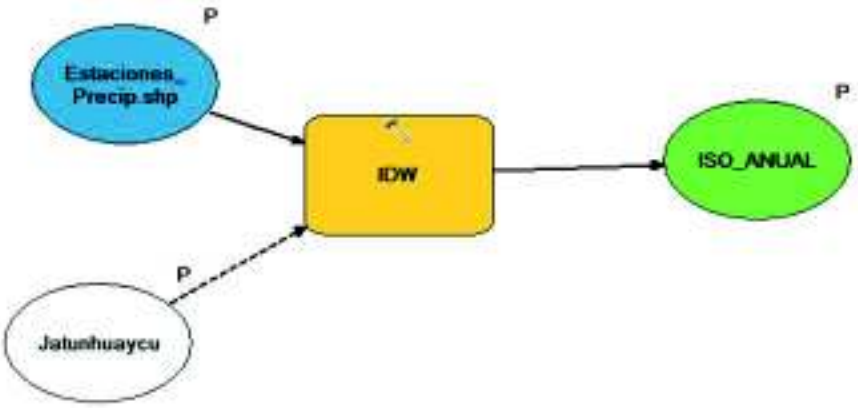
FIGURA 3.6 Distribución de las áreas aferentes según los polígonos de Thiessen.



FUENTE: (Bateman, 2007).

La evaluación de la precipitación media diaria se realizó por cada día considerado en la serie del 17-01-2014 al 16-01-2016, por cada microcuenca y por toda la unidad experimental de estudio. Finalmente la distribución de la precipitación anual se realizó mediante el uso del método de Isoyetas usando un modelo generado en Model builder en el software ArcCatalog10.1 con la herramienta IDW (inverse distance weighted).

FIGURA 3.7 Modelo para la obtención de la precipitación anual



ELABORACIÓN: Autor

3.2.3 Temperatura

La ubicación geográfica de un lugar determina las variaciones de temperatura del aire, además de la influencia de condiciones fisiográficas locales en relación al gradiente altitudinal. La amplitud anual de la temperatura es influenciada con mayor énfasis por el primer factor, mientras que su variabilidad y escala diaria es afectada por el segundo. (Pabón *et al.,* 2001).

La temperatura es una variable con pocos registros en la zona andina, sin embargo su estimación se ha desarrollado mediante correlaciones con el gradiente altitudinal, con resultados relativamente confiables.

Según Eslaba (1992) el perfil altitudinal de la temperatura media anual se concretó mediante el uso de modelos de regresión con datos registrados en diferentes pisos altitudinales. Los resultados obtenidos por este autor permitieron una aproximación aceptable de la temperatura de un determinado sitio, en relación a su rango altitudinal. La metodología para elaborar el modelo de temperatura media mensual del aire se origina a partir de la selección de las estaciones con al menos 15 años de información en la que se integra la altitud, (Grimaldos, 2013) por ejemplo obtuvo la ecuación para Colombia para el periodo 1961 - 1990 bajo esta relación:

$$T = 29.42 - 0.0061H \quad (2)$$

Donde T es la temperatura media del aire y H es la altitud.

Para el cálculo de la temperatura a nivel diario dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu se determinó una ecuación diaria en base al modelo de regresión (Recta de regresión de mínimos cuadrados) temperatura (Y) – altitud (H) de trece estaciones ubicadas en las cercanías de la zona de estudio y sobre los 3000 msnm (Tabla 3.3), comparadas con la estación Humboldt. La forma de la ecuación correspondió a:

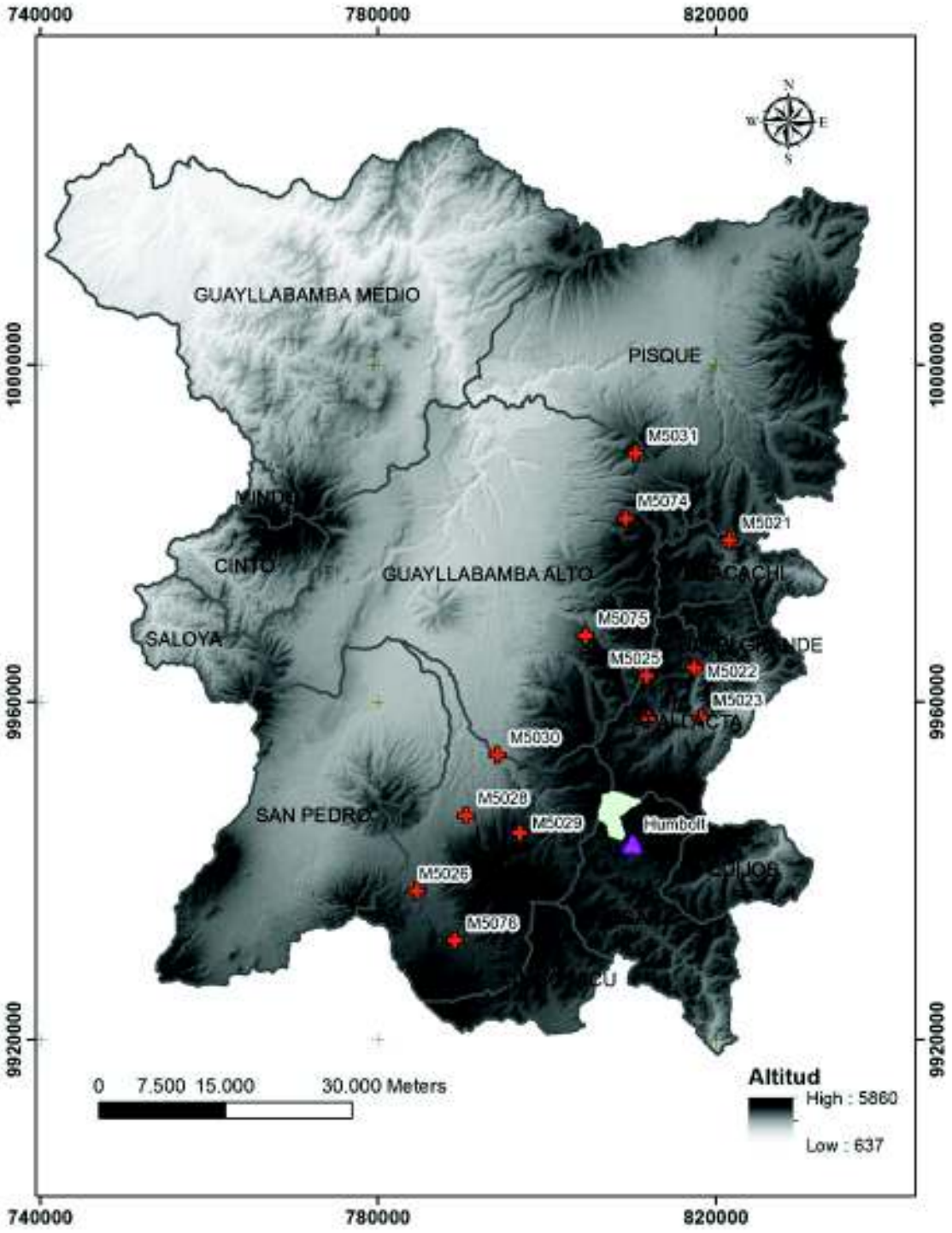
$$Y = a H + b + e \quad (3)$$

Donde Y es la temperatura media del aire, H es la altitud y "*e*" es el residual, *e* = y-y´. Para este análisis "y" es la temperatura real de la estación Humboldt, mientras que "y´" es la temperatura estimada en base a la regresión a nivel diario.

TABLA 3.3 Estaciones con datos de temperatura utilizadas en el modelo de regresión.

Estación	**Altitud**	**Temperatura media diaria (°C)**	**Temperatura máxima diaria (°C)**	**Temperatura mínima diaria (°C)**
M5021	3710	6.77	9.96	3.58
M5022	3620	7.76	11.71	3.81
M5023	3100	12.77	18.42	7.11
M5024	3636	7.44	10.96	3.91
M5025	3920	5.55	8.40	2.69
M5026	3670	8.12	12.76	3.49
M5028	3526	11.11	16.30	5.93
M5029	4100	6.19	10.07	2.31
M5030	3326	12.40	17.17	7.64
M5031	3750	9.53	13.81	5.25
M5074	4100	5.67	9.19	2.15
M5075	4010	6.32	10.33	2.31
M5076	3870	7.11	11.47	2.75
Humboldt	4029	5.61	9.95	1.26

FIGURA 3.8 Ubicación de las estaciones en la cuenca Alta del Guayllabamba.



ELABORACIÓN: Autor

En la figura 3.8 se observa la ubicación de las estaciones del FONAG utilizadas para obtener el gradiente de temperatura dentro de la unidad de estudio. De

acuerdo a la tabla 3.3 el gradiente altitudinal de las estaciones utilizadas en este análisis, varía de 3100 a 4100 msnm.

3.2.4 Evapotranspiración

El principal inconveniente para determinar la evapotranspiración de referencia *ETo* fue la falta de datos dentro de la unidad de estudio, por lo que fue necesario realizar la correlación entre la *ETo* de Hargreaves con la *ETo* de Penman Monteith de la estación meteorológica de Humboldt. El análisis partió desde la determinación de la evapotranspiración de referencia *ETo* que es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. Para el estudio se obtuvo los datos de *ETo* por el método de Hargreaves (ecuación 4) y de Penman – Monteith (ecuación 5) para la estación de Humboldt (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI), según lo indicado por Allen *et al.*, (2006).

$$ETo = 0{,}0023(Tmedia + 17{,}8)\,(Tmax - Tmin)^{0{,}5}\,Ra \quad (4)$$

Donde *ETo* es la evapotranspiración referencial de cultivo (mm día^{-1}), *T* corresponde al valor de la variable temperatura (°C) y *Ra* es el valor de la radiación extraterrestre (mm día^{-1}). La temperatura media se obtiene del promedio entre el valor máximo y mínimo registrado en el día (Allen *et al.,* 2006).

$$ET_0 = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{\mathbf{T}+273}u_2(\boldsymbol{e_s} - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34u_2)} \quad (5)$$

Dónde: *ETo* es la evapotranspiración referencial de cultivo (mm h^{-1}), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa ºC-1), R_n es la radiación neta en la superficie de referencia (MJ m^{-2} h^{-1}) para este estudio se usó las fórmulas empíricas para su obtención, *G* es del flujo del calor del suelo (MJ m^{-2} h^{-1}), constante psicrométrica (kPa ºC-1), *T* temperatura media del aire a 2 metros de altura (ºC), u_2 es la velocidad del viento (m s^{-1}), e_s se refiere a la presión de vapor de saturación (kPa), e_a es la presión real de vapor (kPa), e_s – e_a es el déficit de presión de vapor (kPa), ϒ es la constante piezométrica (kPa °C^{-1}).

Posteriormente se procedió a obtener la ecuación de conversión de datos de ETo diaria desde Hargreaves a Penman-Monteith con el método de regresión; bajo esta consideración se determinó la ETo del tipo Penman – Monteith para los sitios específicos dentro de la unidad experimental de estudio. Finalmente se procedió a obtener la evapotranspiración real ETr mediante el uso de la ecuación 6. Con estos datos se interpoló la ETr de la unidad experimental Jatunhuaycu y de las tres microcuencas.

ETr = *Eto* x *Kc* x *Ks* (6)

Donde *ETr* es la evapotranspiración real (mm día^{-1}), *ETo* es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}), *Kc* es el coeficiente de cultivo (adimensional) y *Ks* el factor de estrés hídrico (adimensional).

Estudios en el páramo (Buytaert *et al.* 2006c; Guzmán *et al.*2015) muestran valores estimados de Kc = 0.42 que representan condiciones naturales del páramo, con vegetación homogénea, sin intervención por agricultura y ganadería intensiva; y registros de Ks = 1, que indican altos contenidos de humedad en el suelo, valores usados en la presente investigación y por parte de Torres (2016) para la microcuenca dos (JTU-M2).

3.2.5 Caudales

La serie de caudales utilizada en el modelo data desde el 17-01-2014 al 16-01-2016, los datos se tabularon a un paso de tiempo diario. Las series de caudal presentaron vacíos horarios considerables por lo que al igual que los días faltantes no se consideraron en el análisis.

3.2.5.1 Coeficiente de Gasto

Se realizó dos ajustes al coeficiente de gasto (*u*), con la fórmula de Rehbock para la ecuación de caudal del vertedero rectangular (7) y con la fórmula de la Universidad Católica de Chile para el vertedero triangular en la ecuación (8) (Sotelo, 1989).

$Q = C.\ b.\ h^{3/2}$; C = 2,592 *u* (7)

$Q = C.\ h^{5/2}$; C = 2,362 *u* (8)

Dónde:
h= carga hidráulica
b= ancho sección rectangular
w= altura desde el piso del canal a la cresta del vertedero
C= coeficiente
u= coeficiente de gasto

3.2.5.2 Aforos

Con el objeto de verificar *in situ* los aportes de las unidades hidrográficas de la parte alta de la cuenca Jatunhuaycu y su correspondencia con el caudal en la parte baja, se realizó una campaña de aforos con el uso de un molinete. En la unidad experimental Jatunhuaycu se realizó tres aforos en dirección de la zona de recarga del flujo principal con el objeto de evaluar el caudal en diferentes tramos. Así mismo se realizó la tabulación de los aforos históricos realizados por la EPMAPS dentro del rango de la serie de datos trabajada, tanto en la parte alta como baja de la cuenca Jatunhuaycu.

3.2.6 Humedad Del Suelo

Para caracterizar el comportamiento de la humedad del suelo FONAG instaló instrumentos automáticos, basados en la mediciones de la permisividad dieléctrica del suelo, denominados TDR Time Domain Reflectometer (Jones *et al.* 2012) citado por Torres (2016), que son sensores bimetálicos colocados en forma horizontal en el horizonte superficial (A) a una profundidad de 10 cm y en el horizonte 2Ab a 70 cm, dentro de una calicata excavada en una ladera de la cuenca, asociados a un datalogger marca Campbell Scientific Cr-200X que registró información del contenido de agua del suelo con una resolución de 5 minutos.

3.3 PROCESO DE APLICACIÓN DEL MODELO GR4J

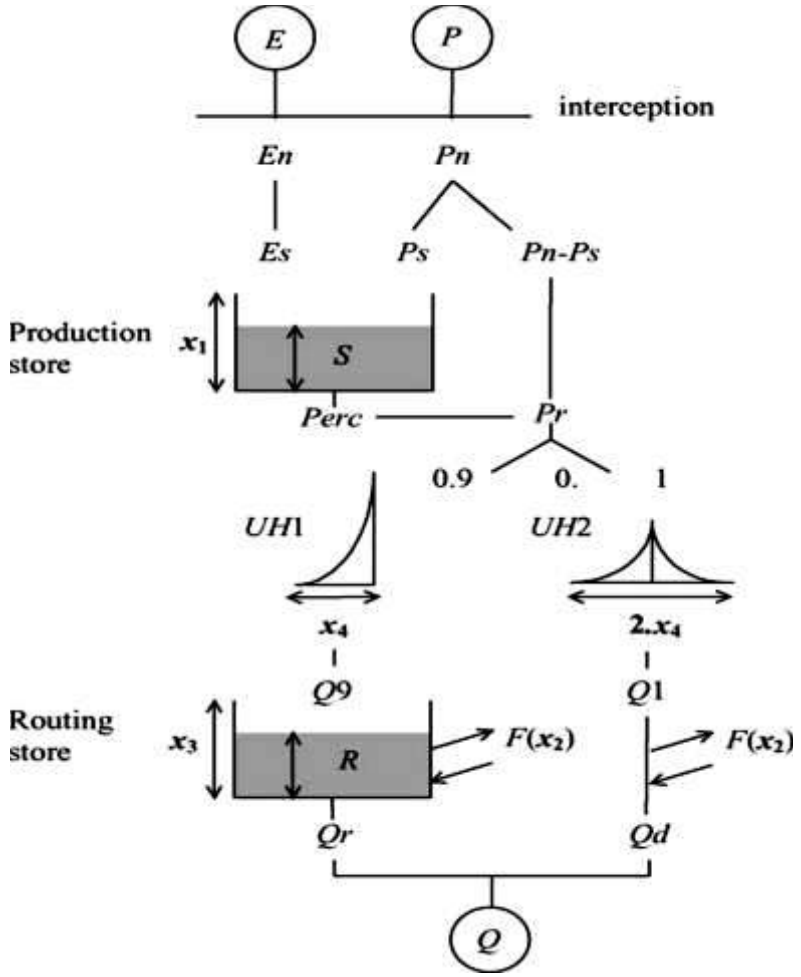
3.3.1 Descripción del Modelo Hidrológico GR4J

El modelo GR4J es un modelo de precipitación-caudal global. El modelo se basa en un enfoque de balance de humedad de suelo, con una producción y

distribución en módulos (Figura 3.9). Usa un paso de tiempo diario y dispone de 4 parámetros ajustables. Su desarrollo se inició Montpellier, Francia, en el instituto “Cemagref”, hoy “Irstea” (Instituto de Investigación en Ciencia y Tecnología para el Medio Ambiente) a principios de 1980, con el objetivo de desarrollar un modelo de simulación robusta y fiable para utilizar en problemas de lluvia-caudal aplicados a la gestión de los recursos hídricos en ingeniería para diseño, pronóstico de inundaciones y flujos de caudales bajos, manejo de reservorios, detección de impacto de cambios de uso de suelo y en el clima (Perrin *et al.,* 2003). El modelo GR4J es un modelo conceptual lluvia-escorrentía considerado como un modelo determinístico agregado.

GR4J tiene en cuenta la humedad del suelo y está compuesto por dos depósitos (uno de producción y uno de enrutamiento) que utilizan reservorios. Con un procedimiento de control de las condiciones de humedad del reservorio, se toma en cuenta las condiciones anteriores y garantiza el funcionamiento en simulación continua. Su estructura combina unos hidrogramas unitarios, así como una función de apertura hacia el exterior no atmosférico (es decir, subterráneo), permitiendo simular el comportamiento global de la gran cuenca hidrológica, que incluye el flujo subterráneo (Martin, 2013).

FIGURA 3.9 Diagrama de la estructura del modelo GR4J.



FUENTE: *(*Perrin *et al.,* 2003*)*

Una descripción detallada del modelo puede indicarse conforme a lo planteado por Domínguez (2016).

- En primer lugar se utiliza un almacenaje de intercepción de cero para determinar la precipitación neta *Pn* y la evapotranspiración *En*.

- Estas valoraciones interactúan en el reservorio de producción, en el que la entrada de lluvia *Ps* y salida de evapotranspiración *Es*, son representadas por una función lineal, relacionada al nivel actual del reservorio (S/x1) en un primer instante y luego su producción es una función de la potencia del contenido del depósito actualizado.

- La cantidad total de agua (*Pr*), salida del reservorio de producción, que alcanza las funciones de transferencia se divide en dos componentes de flujo con una división fija. El 10% del flujo es guiado constante y directamente por un hidrograma unitario UH2, mientras que el 90% del flujo es transferido constantemente por otro hidrograma unitario UH1 con un tiempo de base (x4) que corresponde a la mitad de este último a un reservorio de enrutamiento no lineal.

- En ambos flujos (Q9 y Q1, figura3.9), una función de intercambio de agua de captación (F) actúa igualmente dependiendo del nivel relativo del agua (R/x3) en el reservorio de enrutamiento y de un parámetro x2.

- Por último, el *Q1* (*Qd*) es sumado al flujo de salida *Qr* del reservorio de transferencia para obtener el caudal total (Q).

GR4J gestiona un intercambio intercalado de aguas subterráneas (IGF) a partir de la función F:

$$F = X2 * (R / x3)^{5/2} \quad (9)$$

Donde x2 es una magnitud que puede ser positiva o negativa para las ganancias o pérdidas de agua, respectivamente. Debido a que F actúa igualmente en los flujos rápido y lento, IGF puede estimarse como (Le Moine et al., 2007).

$$IGF = \begin{cases} 2 \times F & \text{if} \quad F > 0 \\ -Min(|F|; R) - Min(|F|; Q_1) & \text{if} \quad F < 0 \end{cases} \quad (10)$$

A pesar de que IGF es una formulación empírica (generalmente no se mide), su significancia es apoyada por la gran cantidad de cuencas en las que ha sido probado (Perrin et al., 2003; Le Moine et al., 2007). Así, IGF se usó como una herramienta de análisis en el cambio de almacenamiento de las microcuencas anidadas y de la unidad experimental Jatunhuaycu. El valor negativo de IGF indicó su definición como salida en la ecuación del balance hídrico (ecuación 13)

con GR4J, caso contrario su valor positivo hubiese indicado una entrada al balance, relacionando al aporte de flujos subterráneos desde cuencas vecinas (Le Moine et al., 2007).

3.3.2 Programación y Parámetros del Modelo

Se utilizó la versión 1.1 (2009) de Charles Perrin (charles.perrin@cemagref.fr) y Vazken Andréassian (vazken.andreassian@cemagref.fr) en Microsoft Excel, programada para Cemagref que es el Centro Nacional de Maquinismo Agrícola, Ingeniería Agrícola, Agua y Silvicultura. Los parámetros del modelo se muestran en la tabla 3.4.

TABLA 3.4 Parámetros del modelo GR4J.

Parámetro	Descripción
x_1 (mm)	Capacidad máxima del tanque de producción
x_2 (mm)	Coeficiente de intercambio de aguas subterráneas
x_3 (mm)	Capacidad máxima para el tránsito en canales
x_4 (días)	Tiempo base del hidrograma unitario UH1

3.4 CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

3.4.1 Nash Sutcliffe

En el presente estudio la calibración de los parámetros se realizó utilizando el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) para la raíz cuadrada diaria transformada de caudales (√Q), mediante el uso de la ecuación (11).

$$E\left(\left(Q^{\frac{1}{2}}\right)\right) = \left(1 - \frac{\sum t(\sqrt{\widehat{Q_t} - \sqrt{Qt}})^2}{\sum t(E(\sqrt{Q_i}) - \sqrt{Q_t\ )^2}}\right) \qquad (11)$$

Dónde: Q_i es el caudal observado en el día *i*, $\hat{Q}t$ es el caudal simulado para el día *i;* y $E(\sqrt{Q_i})$ es el promedio de la raíz cuadrada observada.

Este criterio ha demostrado ser uno de los más adecuados para varias aplicaciones (Perrin *et al*., 2003; Oudin *et al*., 2005; Le Moine *et al*., 2007). Es el más adaptado a este tipo de casos porque reduce el efecto de los flujos pico, que no se observan con frecuencia y cuya incertidumbre en su estimación es relativamente grande (Domínguez, 2016). El principal interés no es la simulación de los caudales pico, sino más bien los caudales mínimos y medios, ya que con la simulación se busca realizar un balance hídrico en el que exista una buena simulación de este tipo de caudales.

3.4.2 Solver

Para la calibración de los parámetros (x1, x2, x3, x4) se usó la herramienta Solver, en la que la optimización de los parámetros se realizó en base al criterio de eficiencia de Nash Sutcliffe máximo; la calibración permitió una mejor representación entre los caudales simulados y observados.

Solver es un programa de complemento de Microsoft Excel que se usa para llevar a cabo análisis y para encontrar un valor óptimo (mínimo o máximo) para una fórmula en una celda objetivo, que está sujeta a restricciones o limitaciones en base a lo indicado por el criterio de eficiencia. Solver ajusta los valores de las celdas de variables de decisión para que cumplan con los límites de las celdas de restricción y den el resultado deseado en la celda objetivo (Microsoft, 2017).

3.4.3 Factor de Corrección del Área Equivalente de Recarga Hídrica

Con los parámetros calibrados del modelo, se procedió a obtener el factor de corrección del área de recarga del gasto o superficie equivalente, generado en cada microcuenca y unidad de estudio. La obtención de este factor se basó en la metodología usada por Le Moine *et al.,* (2007), quien en lugar de utilizar IGF para alcanzar el balance hídrico propuso un enfoque diferente utilizando el modelo GR4J, en el que la función de intercambio de aguas subterráneas se pone a cero (x2=0) dentro de la programación del modelo, sin embargo se

utiliza el parámetro libre x2 (asumiendo porcentajes de pérdidas/ganancias) para corregir la precipitación, evapotranspiración o incluso la superficie de captación; suponiendo que las mediciones de precipitación y evapotranspiración en la zona son justas. En el presente estudio, se asumió valores referenciales a las pérdidas observadas dentro del balance hídrico (x2=negativo) y se procedió a calibrar los parámetros del modelo hasta obtener un criterio de eficiencia Nash Sutcliffe aceptable (≥ 50 %). El factor de corrección obtenido (x2) se multiplicó con el área original o inicial para obtener el área efectiva de recarga, la cual para este estudio se asume en las cercanías de las vertientes, cuerpos de agua y zonas riparias en la relación a la dirección y valor de la pendiente y su influencia sobre los flujos superficiales. La definición exacta de estas zonas de recarga estaría supeditada con la ejecución de estudios complementarios de flujos subterráneos, por lo que los resultados corresponderían a una representación del área equivalente.

Domínguez (2016) utilizó este enfoque, para determinar la superficie equivalente del área de recarga hídrica, que es la superficie de captación necesaria para alcanzar el balance hídrico (mientras que el caudal se simula adecuadamente). Las simulaciones de caudal obtenidas con este cambio continuaron siendo justas para el NS, obteniéndose valores de 0,90, 0,66 y 0,79 en las microcuencas El Bayo, Chuki Marka y Cerro Gato, respectivamente, ubicadas en la Isla San Cristóbal en Galápagos.

Los resultados obtenidos por Domínguez (2016) en un contexto estrovolcánico, indicaron una superficie equivalente con relación a la superficie real del 13%, 216% y 140% para El Bayo, Chuki Marka y Cerro Gato, respectivamente (Domínguez, 2016).

3.5 BALANCE HÍDRICO

Para el cálculo del balance hídrico anual se utilizó la ecuación general aplicada a este tipo de ecosistema páramo por parte de Buytaert *et al., (*2006c); Guzmán *et al., (*2015), de acuerdo a la ecuación (12)

$$P = E + ETr + Q + L \quad (12)$$

Donde *P*, es la lámina de precipitación en mm, *E* representa la cantidad de agua interceptada por la vegetación y evaporada directamente desde el dosel en mm, que para las zonas de páramo, es relativamente baja según Buytaert *et al.* (2006c) citado por Torres (2016), este término puede ser excluido en la ecuación, *ETr* es la evapotranspiración real (mm), *Q* representa el caudal de la unidad hidrográfica en mm y *L* se refiere a la percolación profunda en mm, la cual se estima como la variable remanente de la ecuación antes indicada (12).

El balance hídrico de acuerdo al modelo GR4J, está dado por la ecuación (13), en la que L es remplazada por IGF que representa las pérdidas o ganancias de aguas subterráneas, ganancias que para este estudio no existen desde otras cuencas hacia la unidad experimental Jatunhuaycu.

$$P = ETr + Q + IGF + \Delta S \quad (13)$$

Donde IGF es el intercambio de aguas subterráneas y ΔS es el cambio de almacenamiento en la cuenca (Domínguez, 2016). El signo del valor de IGF obtenido, indicaría ganancias (+) y/o pérdidas (-) dentro del balance, indicándose que en el caso de ser negativo, este no se restaría dentro de la ecuación (13). El valor de ΔS resulta de la diferencia entre las salidas y la entrada del balance hidrológico dentro cada unidad hídrica en estudio.

Resumen del capítulo

Para el uso del modelo hidrológico GR4J, se utilizó datos a paso de tiempo diario de precipitación, evapotranspiración y de caudales a nivel la unidad hidrográfica y sus microcuencas. El relleno de datos de precipitación es indispensable por la necesidad de contar con una serie continua para el uso del modelo, así como de los datos de evapotranspiración. La regresión lineal entre el gradiente altitudinal y datos reales de temperatura dentro de la zona, permitieron estimar los valores de temperatura y posteriores valores de evapotranspiración referencial, inicialmente por el método de Hargreaves y posteriormente por el método de Penman – Monthei. La modelación hidrológica se calibró con el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) para la raíz cuadrada diaria de caudales, calibrada a través de la herramienta Solver. El área equivalente de recarga hídrica se obtuvo a través de un factor de corrección propuesto por Le Moine *et al*., (2007).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA UNIDAD JATUNHUAYCU

El modelo GR4J permitió la simulación de los caudales mediante el uso de los resultados de la restitución cartográfica, series completas de precipitación y evapotranspiración real (Hargreaves/Penman-Monteith), obteniendo el balance hídrico y superficies equivalentes de recarga hídrica de la unidad de estudio y sus microcuencas anidadas.

4.1 CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA Y CLIMÁTICA

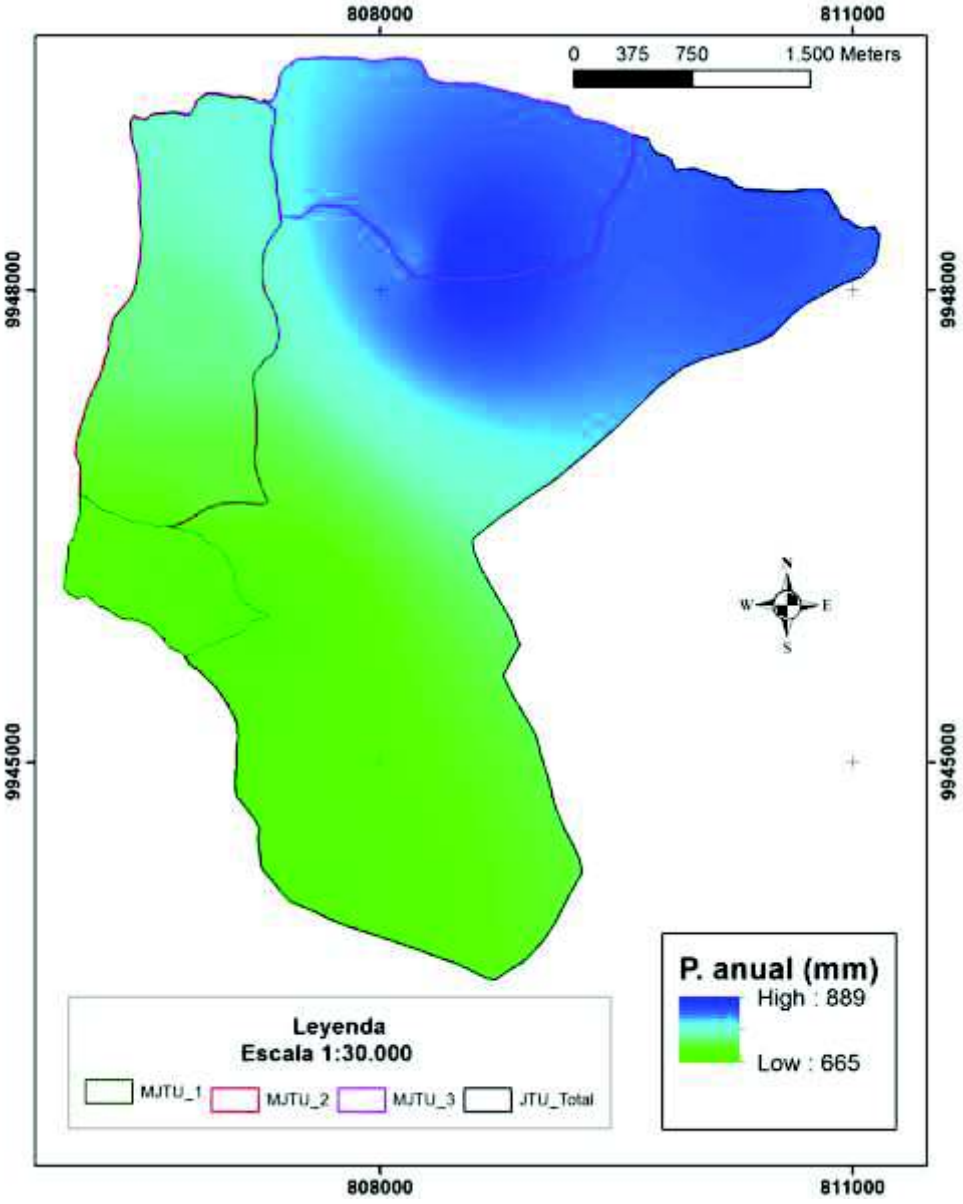
La unidad de estudio Jatunhuaycu presenta una morfología caracterizada por pendientes entre el 12 al 40 %, con presencia de zonas escarpadas específicamente en el límite entre las microcuencas dos y tres con pendientes superiores al 40 %; estas zonas se caracterizan por la escaza vegetación existente (Asteraceae y Poaceae) y un mayor porcentaje de suelo descubierto, con presencia de rocas y zonas de “arenales”. La producción hídrica de la unidad experimental Jatunhuaycu está relacionada a formaciones geológicas presentes en la zona (percolación), constituidas por acuíferos de alta transmisividad (Alvarado, 2009) y de rocas con diaclasamiento intenso (Villares, 2010). La precipitación presenta una relación directa, marcada conforme al aumento del gradiente altitudinal, existiendo una relación inversa con la variable de temperatura y evapotranspiración.

4.1.1 Precipitación

Los resultados obtenidos en el periodo 17/01/2014 a 16/01/2016 indican que la precipitación anual dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu (JTU-Total) se distribuye desde los 665 mm en la parte baja hasta los 889 mm en la parte alta, existiendo mayor precipitación en la zona noreste, en las cercanías de la divisoria de agua de la unidad en estudio. La precipitación media anual en la microcuenca uno (JTU-M1) fue de 671,2 mm, en la microcuenca dos (JTU-M2) la precipitación media anual fue de 735,4 mm en dos años de análisis de datos diarios, en

contraste a los 840,2 mm obtenidos por (Torres, 2016), pero con la diferencia del uso de un periodo más corto para el análisis de 480 datos (16 meses). La precipitación en la microcuenca tres (JTU-M3) fue de 848,5 mm y en la unidad experimental Jatunhuaycu (JTU-Total) en estudio correspondió a 762,9 mm. A nivel general la variación espacial de la precipitación en toda la unidad de estudio, se muestra en la figura 4.1.

FIGURA 4.1 Distribución de la precipitación anual en la unidad experimental Jatunhuaycu.



ELABORACIÓN: Autor

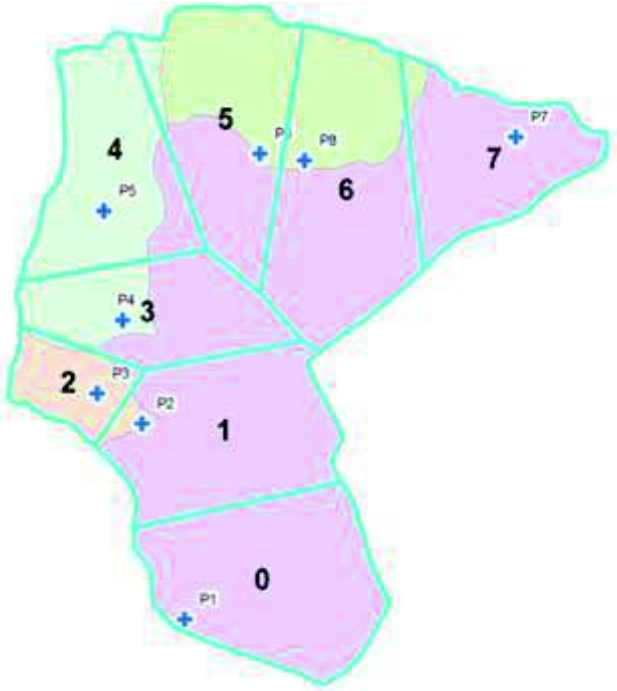
La precipitación media diaria se evaluó en base a las zonas de influencia de la precipitación con el uso de los Polígonos de Thiessen (figura 4.2) para los datos de las estaciones de monitoreo instaladas dentro de la unidad de estudio P1-P8, cuya variabilidad anual y diaria se muestra en la tabla 4.1.

TABLA 4.1 Precipitación media anual y promedios diarios en cada estación de monitoreo.

Estación	Código	Longitud	Latitud	Precipitación media anual (mm)	Precipitación media diaria (mm)
P1	JTU_01_PT_11	807522	9944182	685,14	1,88
P2	JTU_01_PT_22	807151	9945875	665,21	1,82
P3	JTU_01_PT_32	806765	9946131	672,03	1,84
P4	JTU_01_PT_43	806987	9946766	721,14	1,98
P5	JTU_01_PT_53	806824	9947710	743,30	2,04
P6	JTU_01_PT_63	808170	9948210	814,38	2,23
P7	JTU_01_PT_73	808555	9948148	888,59	2,43
P8	JTU_01_PT_83	810383	9948353	837,70	2,30

ELABORACIÓN: Autor

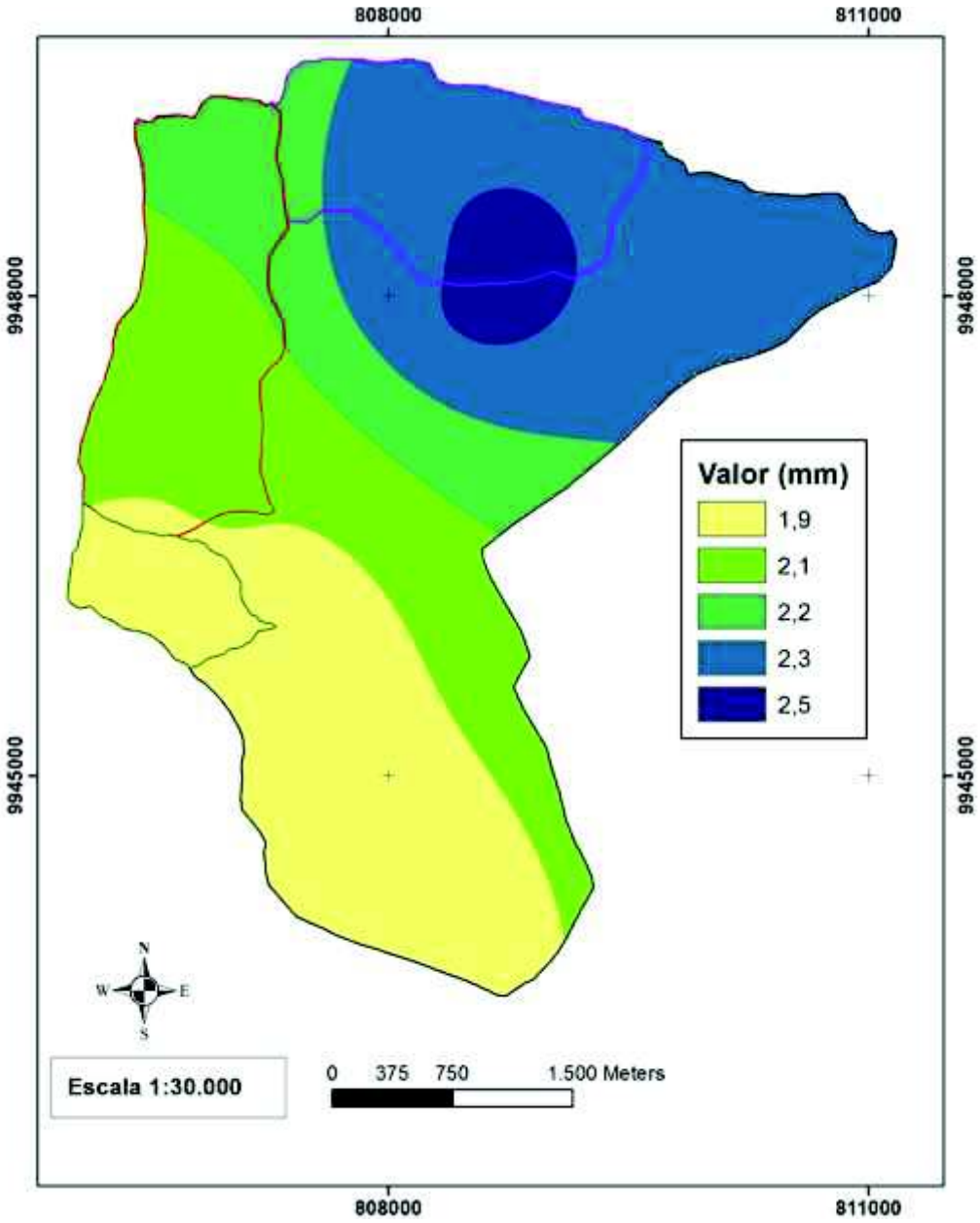
FIGURA 4.2 Polígonos de Thiessen usados en la distribución de la precipitación media diaria.



ELABORACIÓN: Autor

La variación de la precipitación media diaria correspondió a 1,9 mm día^{-1} en la parte baja hasta los 2,5 mm día^{-1} en la parte alta (Figura 4.3). Según Torres (2016), la precipitación media diaria en la microcuenca dos (JTU-M2) varía desde 1,85 a 2,25 mm día^{-1}, observándose resultados relativamente equivalentes en este estudio con valores desde 1,9 a 2,2 mm día^{-1} para esa misma microcuenca.

FIGURA 4.3 Distribución de la precipitación diaria en la unidad experimental Jatunhuaycu.

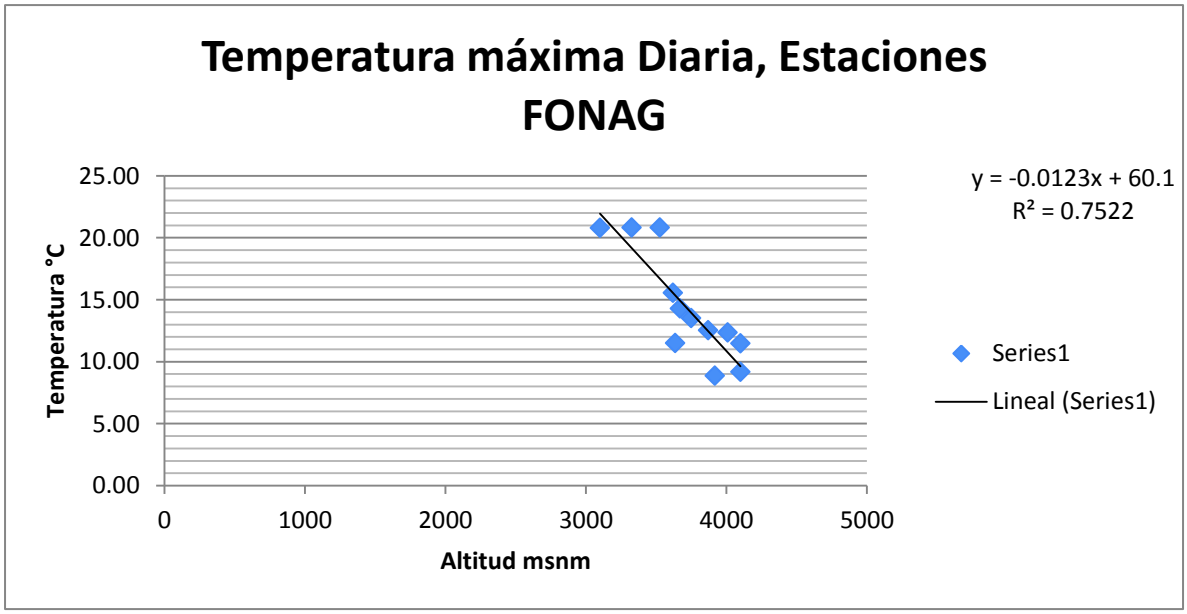


ELABORACIÓN: Autor

4.1.2 Temperatura

Con las ecuaciones de las regresiones diarias entre la temperatura y la altitud (figura 4.4) desde el 17-01-2014 al 16-01-2016 se obtuvo los datos de temperatura máxima y mínima para las microcuencas y unidad de estudio Jatunhuaycu. En total se obtuvieron 730 ecuaciones diarias para temperatura máxima y 730 ecuaciones diarias para temperatura mínima, bajo esta relación (anexo 3).

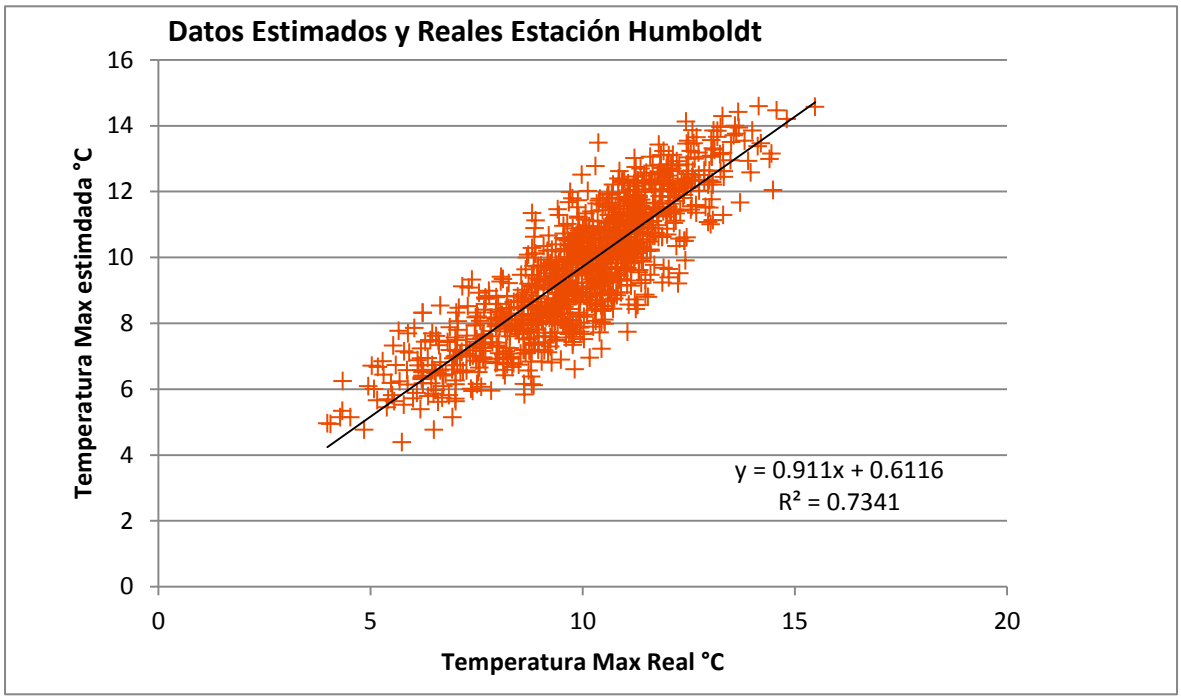
FIGURA 4.4 Ejemplo de la forma de la ecuación usada en la estimación de la temperatura para Jatunhuaycu.



ELABORACIÓN: Autor

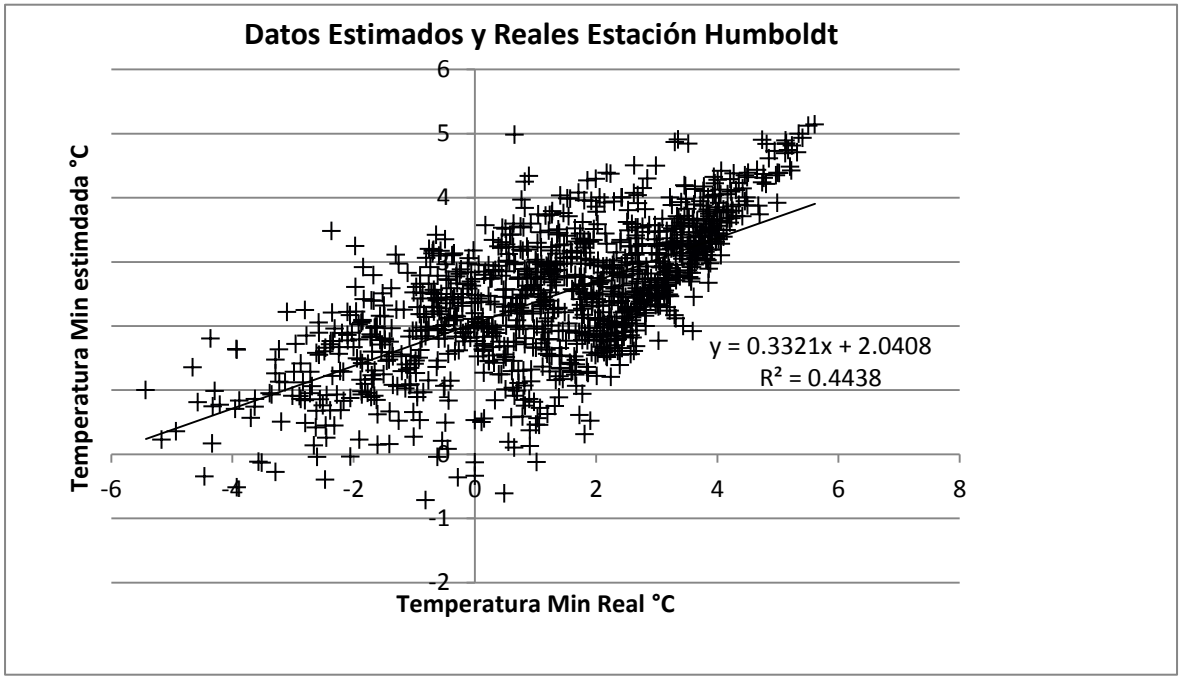
A nivel general los datos estimados mediante el uso de las ecuaciones diarias y los datos reales de temperatura de la estación Humboldt presentan un coeficiente de determinación R^2 de 0,73 para la temperatura máxima (Figura 4.5) y de 0,44 para la temperatura mínima (Figura 4.6). Los resultados de temperatura usados posteriormente para obtener la evapotranspiración dentro del modelo se obtuvieron en base a una ecuación diaria, obtenida de la regresión lineal de la variabilidad de los datos de las estaciones mencionadas en la tabla 3.3.

FIGURA 4.5 Evaluación de datos estimados y reales de temperatura máxima.



ELABORACIÓN: Autor

FIGURA 4.6 Evaluación de datos estimados y reales de temperatura mínima.



ELABORACIÓN: Autor

Con las temperaturas máximas y mínimas estimadas, se ajustó las ecuaciones con el residual de la comparación con los datos de temperatura de la estación Humboldt. Se observa que existe una buena correlación entre la temperatura con la elevación del terreno, hecho que puede evidenciarse en el monitoreo en tiempo real, con intervalos cortos de tiempo (Hernández, 2001).

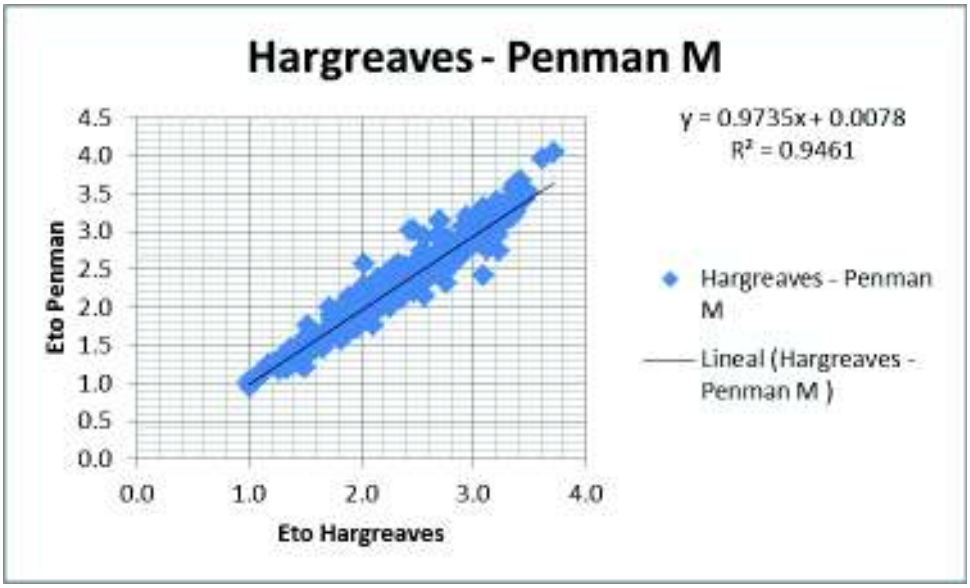
4.1.3 Evapotranspiración

Con la estimación de los datos de temperatura dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu, se obtuvo la *ETo* por el método de Hargreaves y posteriormente se procedió a realizar su transformación a *ETo* del tipo Penman Montheith (figura 4.7) mediante el uso de la ecuación (13).

$$Y = 0.9735\ X + 0.0078 \quad (13)$$

Dónde Y es la *ETo* del tipo Penman Montheith y X corresponde a la *ETo* por el método de Hargreaves, obtenida en las diferentes estaciones dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu.

FIGURA 4.7 Regresión lineal para la obtención de la *Eto* en la unidad experimental.



ELABORACIÓN: Autor

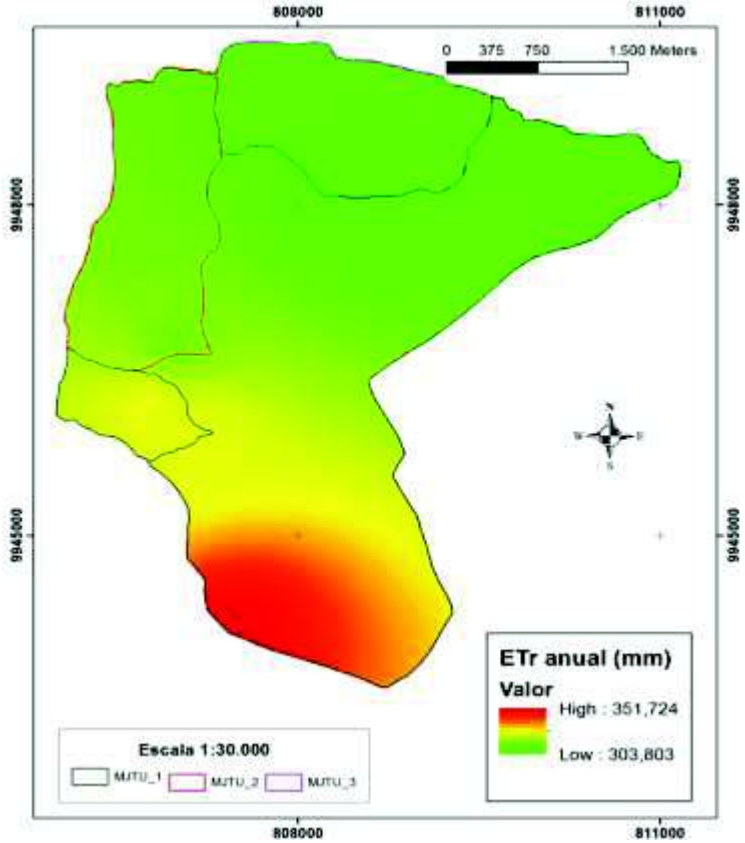
Posteriormente se procedió a determinar la Evapotranspiración real *ETr*, conforme a lo indicado en la tabla 4.2.

TABLA 4.2 Evapotranspiración real en relación a la ubicación de las estaciones de monitoreo de la precipitación.

ELABORACIÓN: Autor

Estación	Código	Longitud	Latitud	ETr anual (mm)	ETr diaria (mm)
P1	JTU_01_PT_11	807522	9944182	351,73	0,96
P2	JTU_01_PT_22	807151	9945875	326,96	0,90
P3	JTU_01_PT_32	806765	9946131	326,96	0,90
P4	JTU_01_PT_43	806987	9946766	314,56	0,86
P5	JTU_01_PT_53	806824	9947710	314,56	0,86
P6	JTU_01_PT_63	808170	9948210	303,80	0,83
P7	JTU_01_PT_73	808555	9948148	303,80	0,83
P8	JTU_01_PT_83	810383	9948353	303,80	0,83

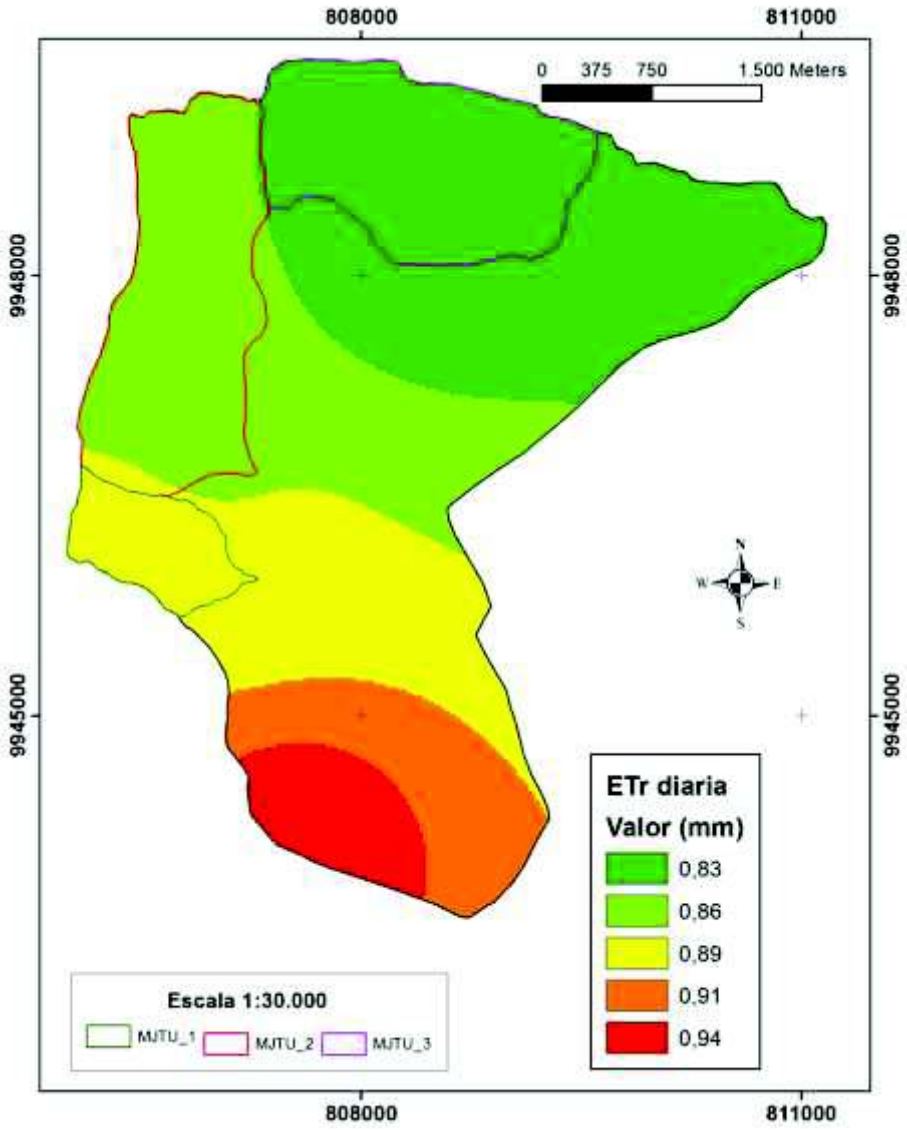
FIGURA 4.8 Distribución de la *ETr* anual en la unidad de estudio.



ELABORACIÓN: Autor

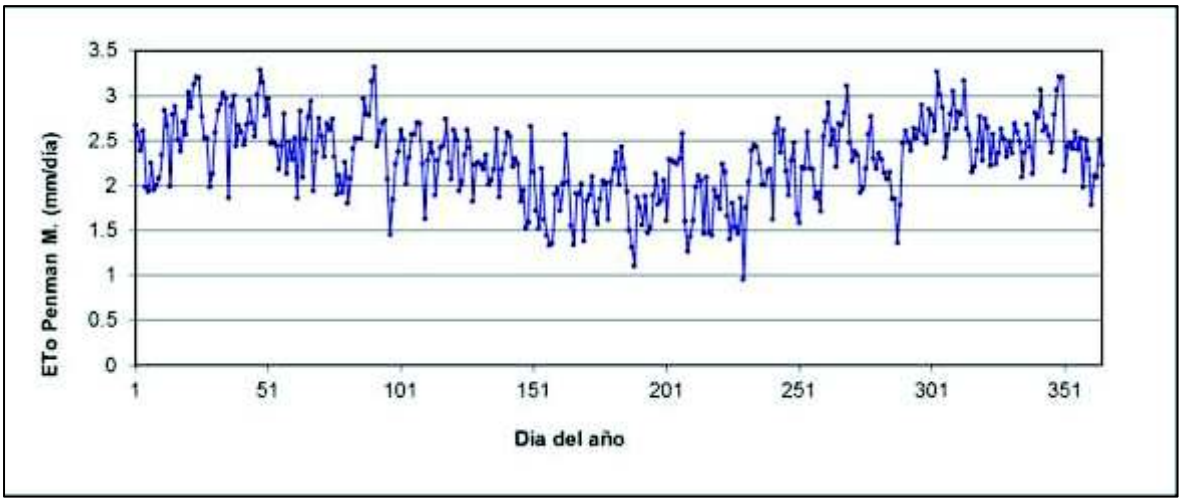
La ETR media anual (Figura 4.8) varía entre 303,8 y 351,7 mm, observándose diferencias significativas en relación al gradiente altitudinal (temperatura) presente en la unidad de estudio, el cual varía de 4000 msnm en la parte baja a 4615 msnm en la parte alta (figura 4.4). A una escala diaria (Figura 4.9) se observa diferencias desde un valor de 0,83 a 0,94 mm día^{-1} dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu.

FIGURA 4.9 Distribución de la *ETr* diaria en la unidad de estudio.



ELABORACIÓN: Autor

FIGURA 4.10 Variabilidad de la *ETr* media diaria a nivel anual para la unidad experimental Jatunhuaycu.



ELABORACIÓN: Autor

La evapotranspiración referencial dentro de la unidad en estudio (figura 4.10) muestra una marcada diferencia durante el año, existiendo valores pico de 3,4 mm día^{-1} a valores relativamente bajos en el orden de 0,9 mm día^{-1}.

4.1.4 Caudal

Los caudales en la microcuenca uno JTU-M1 presentan un promedio diario de 1,30 l/s; en la microcuenca dos JTU-M2 de 4,72 l/s, en la microcuenca tres JTU-M3 de 23,16 l/s y en la unidad experimental JTU-Total un promedio de 120, 39 l/s. Se observa una considerable diferencia en el caudal específico entre la microcuenca tres y las otras dos (tabla 4.3), apreciándose altos contenidos de materia orgánica en esta microcuenca (Figura 2.7) los cuales varían entre valores de 16,26 a 26,59 % cubriendo más del 90 % de la superficie de esta microcuenca (Jumbo & Torres, 2016). Al existir mayores contenidos de materia orgánica en el suelo se indicaría una mejor regulación hidrológica en la microcuenca, existiendo de acuerdo a Torres (2016), un patrón lineal significativo del comportamiento de la humedad del suelo con la materia orgánica con un $r^2 = 0,73$ (Figura 2.11C).

TABLA 4.3 Relaciones área y caudal para las microcuencas y unidad de estudio.

Unidad	Área (km^2)	Caudal (l/s)	Caudal Específico ($l/s/km^2$)
Jatunhuaycu	15,866	120,39	7,588
JTU-M1	0,705	1,30	1,843
JTU-M2	2,519	4,72	1,873
JTU-M3	2,347	23,16	9,867

ELABORACIÓN: Autor

Los coeficientes de escorrentía obtenidos para esta zona por Ochoa *et al.,* (2016), indicarían un menor volumen de agua escurrida y un mayor de agua infiltrada; los altos valores de coeficientes de escorrentía obtenidos por otros autores para esta zona (Andrade, 1996), indicarían que no existe aporte de cuencas vecinas específicamente al caudal de la unidad experimental Jatunhuaycu.

De acuerdo al análisis de los datos históricos y a los aforos realizados en la cuenca Jatunhuaycu en el rango de tiempo en análisis, se observa diferencias entre el aporte (caudal) de las unidades hidrográficas en la parte alta (Jatunhuaycu y Yacupamba) con el caudal en el punto de captación de la EPMAPS en la parte baja (tabla 4.4; figura 4.11).

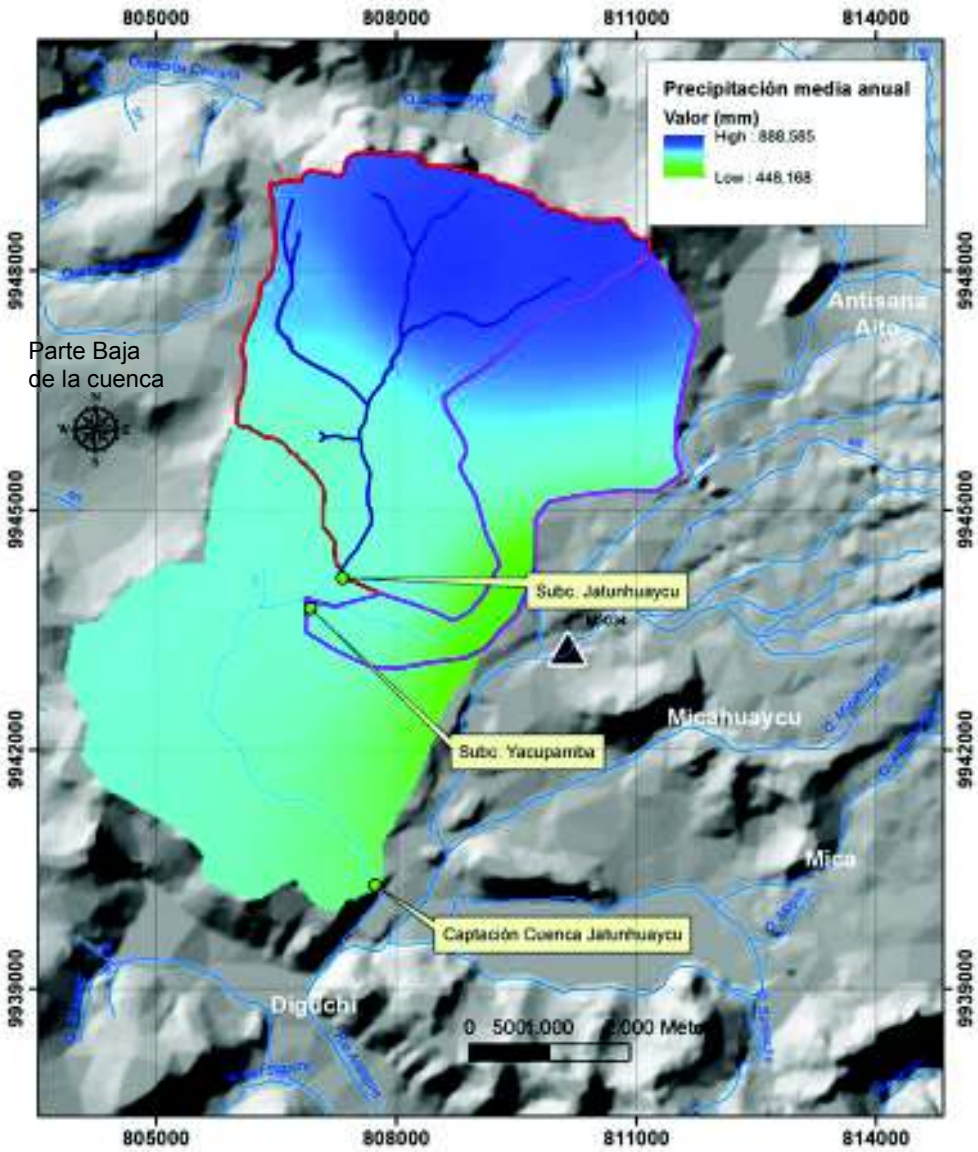
TABLA 4.4 Aforos en los principales cauces dentro de la cuenca Jatunhuaycu.

Fecha	**Subcuenca Jatunhuaycu (MS30)** l/s	**Subcuenca Yacupamba (MS32)** l/s	**Captación Cuenca Jatunhuaycu** l/s
10/02/2014 10:15	45,0	71,0	184,0
01/04/2014 11:20	43,0	85,0	228,0
08/07/2014 11:20	164,0	80,0	611,0
21/10/2015 11:35	63,0	79,0	229,0
14/12/2015 11:45	52,0	52,0	296,0
13/02/2016 10:00	67,0	72,0	191,0
27/04/2016 12:05	64,0	63,0	185,0
09/08/2016 11:25	71,0	80,0	356,0
20/07/2017 10:25	108,0	107,0	394,0
Promedio	75,0	77,0	297,0

FUENTE: EPMAPS

ELABORACIÓN: Autor

FIGURA 4.11 Ubicación referencial de los puntos de aforo y distribución de la precipitación media anual en toda la cuenca Jatunhuaycu.



ELABORACIÓN: Autor

Al analizar la cuenca Jatunhuaycu (40,94 km^2) en el punto de captación de la EPMAPS ubicado a la salida de la cuenca (Figura 4.11) y en base a los datos de aforos, el caudal específico para la parte baja de la cuenca (15,71 km^2)

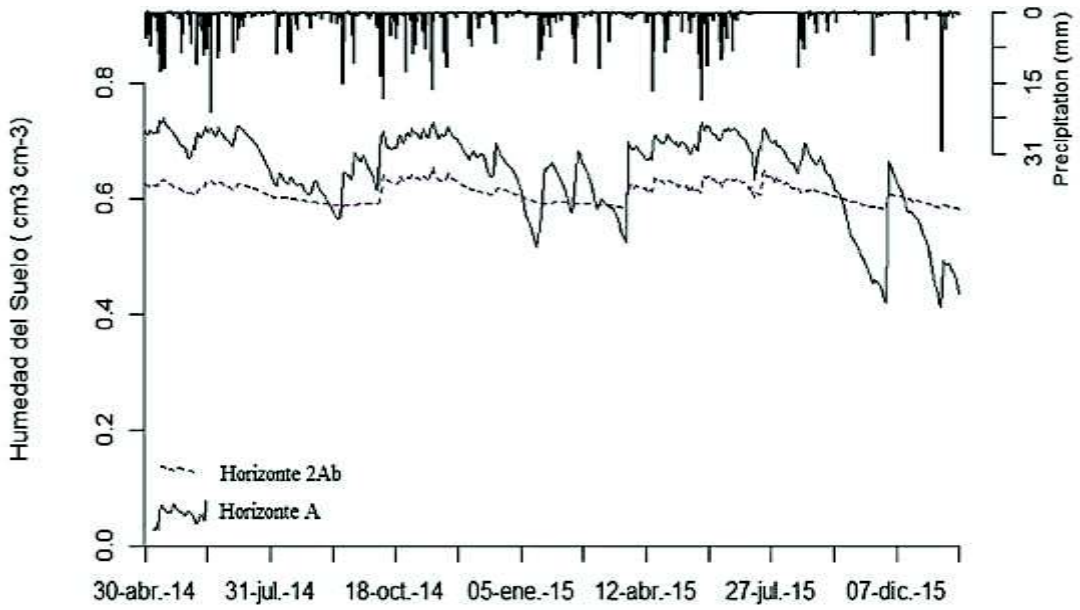
correspondería a 9,24 l/s/km^2; superior al de la unidad experimental Jatunhuaycu en la parte alta (7,588 l/s/km^2) a pesar de contar con un área equivalente (15,86 km^2) y una mayor precipitación anual de 888 mm. Este hecho indicaría un aporte significativo de la percolación profunda desde la parte alta (unidad de estudio) hacia la parte baja de la cuenca Jatunhuaycu, en la que la precipitación media anual se encuentra en el orden de los 680 mm. Sin embargo la percolación de la unidad de experimental Jatunhuaycu y de la unidad hídrica adyacente, Yacupamba, aportarían significativamente al caudal de toda la cuenca Jatunhuaycu (40,94 km^2) en el punto de captación de la EPMAPS, relacionado al caudal específico que para la parte baja de la cuenca (15,71 km^2) correspondería a 9,24 l/s/km^2; superior al de la unidad Jatunhuaycu (7,588 l/s/km^2) en un área equivalente (15,86 km^2) y en relación a las formaciones geológicas caracterizadas en la zona (Alvarado, 2009) desde en la parte media - alta.

La propuesta de manejo para el caudal de captación de la EPMAPS en toda la cuenca Jatunhuaycu deberá realizarse en relación a la formación geológica Yacupamba, la cual comprendería el lado este de la cuenca Jatunhuaycu, parte oeste de la cuenca Antisana y parte sur de la cuenca Antisana Alto, interviniendo estas mediante la restauración activa de las zonas degradadas (especies nativas), intervención biofísica y mejorando las condiciones de las zonas conservadas mediante la restauración pasiva.

4.1.5 Humedad del Suelo

La humedad del suelo presenta diferentes fluctuaciones en los dos horizontes (A y 2Ab) ante diferentes eventos de precipitación.

FIGURA 4.12 Humedad del suelo en dos horizontes en la parte media de la unidad experimental de estudio.



ELABORACIÓN: Autor

En la figura 4.12 se observa una mayor variación de la humedad en el suelo en relación a la precipitación dentro del rango de la serie de datos analizada, observándose una marcada influencia en el primer horizonte a una profundidad de 10 cm, si se considera que la humedad del suelo en las capas superficiales es mayor y que los mayores contenidos de materia orgánica se encuentran hasta una profundidad de análisis de 30 cm (Jumbo & Torres, 2016), relacionando este hecho con el contenido de humedad del suelo (Torres, 2016).

El primer horizonte tiene una alta capacidad de infiltración, lo que se relaciona con los bajos coeficiente de escorrentía en la unidad experimental Jatunhuaycu obtenidos por Ochoa *et al.,* (2016). El segundo horizonte en cambio sugiere una capacidad de infiltración más baja, retiene gran cantidad de humedad lo que podría estar asociado a la escorrentía subsuperficial, la cual podría manifestarse en la superficie en la parte más baja de la unidad de estudio alimentando el cauce principal (Velarde & Camones, 2015).

4.2 BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA, UNIDAD DE ESTUDIO Y SUS MICROCUENCAS

El balance hídrico en la unidad experimental de estudio con la fórmula general indica variaciones significativas en la producción de caudal (mm) y de percolación profunda (tabla 4.5). Según Ochoa *et al.*, (2016) en su estudio sobre los Impactos del uso de la tierra en la respuesta hidrológica de las cuencas tropicales de los Andes en el periodo del 13/11/2013 al 16/02/2016, la lámina de caudal para la unidad experimental Jatunhuaycu fue de 214 mm, para la microcuenca uno de 59 mm, microcuenca dos de 57 mm y la microcuenca tres de 315 mm; la precipitación varió de 767 mm, 641 mm, 739 mm y 849 mm, respectivamente. Se evidencia similitud en los resultados obtenidos en la presente investigación conforme a los resultados mostrados del balance hídrico mostrados en la tabla 4.5.

TABLA 4.5 Balance hídrico de la unidad y microcuencas de estudio.

Unidad	Área (km^2)	Precipitación anual (mm)	Evapotranspiración anual (mm)	Caudal anual (mm)	Percolación profunda anual (mm)
JTU-Total	15.866	762.87	318.313	239.302	205.255
JTU-M1	0.705	671.166	326.956	58.151	286.059
JTU-M2	2.519	735.39	314.198	59.090	362.102
JTU-M3	2.347	848.47	303.803	311.194	233.473

ELABORACIÓN: Autor

De los resultados mostrados en la tabla 4.5, la microcuenca dos es la que presenta una mayor percolación (49,23 %) y una lámina de caudal relativamente pequeña si se considera el tamaño de su superficie y la precipitación anual presente en la zona; en contraste la microcuenca tres (27,51 %), a pesar de tener una superficie aproximada al tamaño de la microcuenca dos, presenta una mayor producción de caudal, observándose una menor percolación de entre las tres microcuencas anidadas. En esta microcuenca es importante mencionar los altos contenidos de materia orgánica que difieren de toda la unidad experimental en estudio. La percolación para la unidad experimental en su conjunto es de 26,90

%, para la microcuenca uno es de 42,62 %, para la microcuenca dos de 49,23 % y para la microcuenca tres de 27,51 % del total de la precipitación.

El balance hídrico para toda la cuenca Jatunhuaycu, delimitada en la captación de la EPMAPS, se muestra en la tabla 4.6, en la misma se observa que la percolación profunda disminuye a nivel de toda la cuenca (148.27 mm) en comparación con la percolación de la unidad experimental Jatunhuaycu (205.2 mm) en la parte alta.

TABLA 4.6 Balance hídrico de la cuenca Jatunhuaycu.

Unidad	Área (km^2)	Precipitación anual (mm)	Evapotranspiración anual (mm)	Caudal anual (mm)*	Percolación profunda anual (mm)
Jatunhuaycu	40.96	709.12	332.18	228.67	148.27

* *En base a la serie de aforos, tabla 4.4.*

ELABORACIÓN: Autor

4.3 RESULTADOS DE LAS CORRIDAS DEL MODELO GR4J

4.3.1 Simulación de Caudales y Calibración de Parámetros

En la tabla 4.7 se muestran los parámetros calibrados en base al criterio de eficiencia NS, observándose una diferencia marcada en el parámetro X1 de la microcuenca uno, en la cual el caudal existe una marcada diferencia con las otras microcuencas en cuanto al caudal y la precipitación diaria.

TABLA 4.7 Coeficiente de Nash y parámetros calibrados en el modelo.

Unidad	Nash(VQ)	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	X4 (mm)
Jatunhuaycu	68.8	615.40	-3.87	29.29	1.14
JTU-M1	53.2	13290.86	0.93	23.64	0.94
JTU-M2	78.5	492.75	-15.49	29.81	1.11
JTU-M3	67.9	1071.16	-3.22	31.18	0.56

ELABORACIÓN: Autor

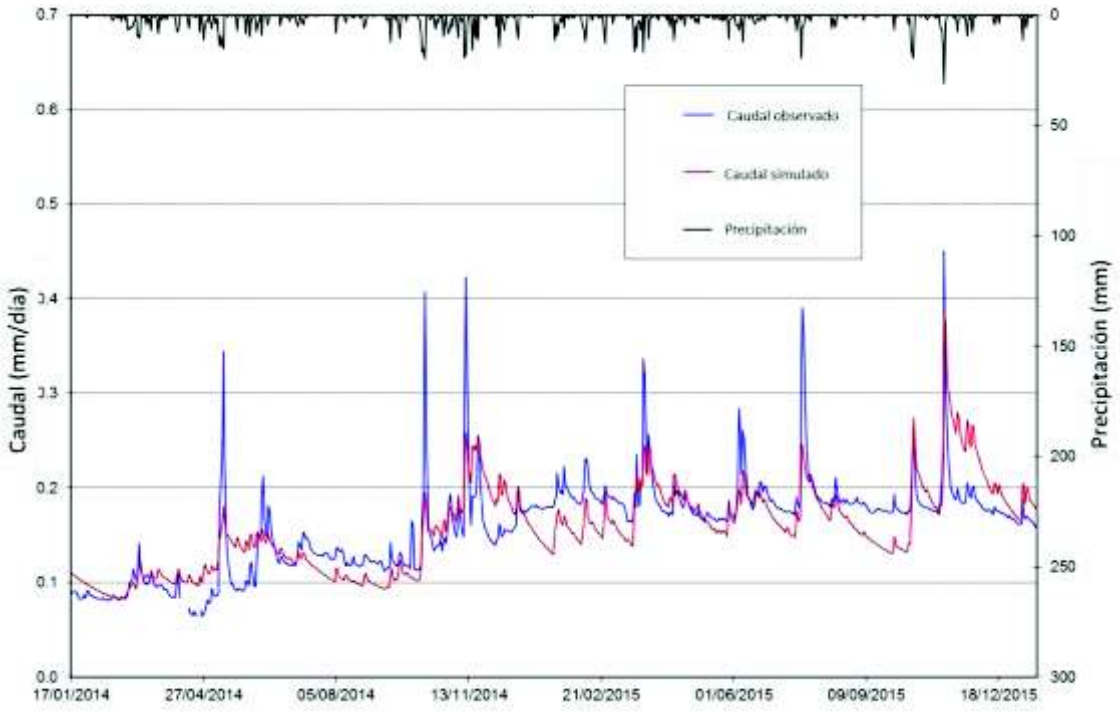
En todos los casos el valor obtenido para el parámetro x1 (máxima capacidad del tanque de producción) es considerablemente alto sí se compara además con los valores obtenidos por Carvajal & Roldán (2007) en el que se menciona además que el tanque de producción no tiene un significado físico directo, por tal motivo es difícil interpretar estos resultados en términos físicos. En investigaciones anteriores, se ha encontrado que entre mayor sea la precipitación sobre la cuenca, mayor es la capacidad del tanque de producción (Carvajal & Roldán, 2007).

Microcuenca Uno JTU-M1

Se observa que la modelación con GR4J para esta microcuenca (Figura 4.13), presenta un menor ajuste en cuanto al criterio NS (53.2/100) y en la simulación de caudales en cuanto a las tres microcuencas.

El análisis de la serie de datos indica que la precipitación anual para esa zona en el primer año (2014-2015) osciló entre 718,92 mm y un caudal anual de 71,52 mm, mientras que para el segundo año (2014-2015) presentó 623,41 mm de precipitación y un valor de 69, 28 mm de caudal dentro del balance. Estos resultados muestran una diferencia en la regulación hídrica a nivel anual si se compara específicamente la salida de caudal, la cual puede estar sujeta a variables como datos atípicos (anexo 4), errores en el registro o posibles efectos de la restauración pasiva de la zona (degradación antrópica) que inició en el 2014 por parte del FONAG, con influencia directa en la vegetación presente en la zona.

FIGURA 4.13 Hidrograma de caudales simulados y observados en la microcuenca uno.

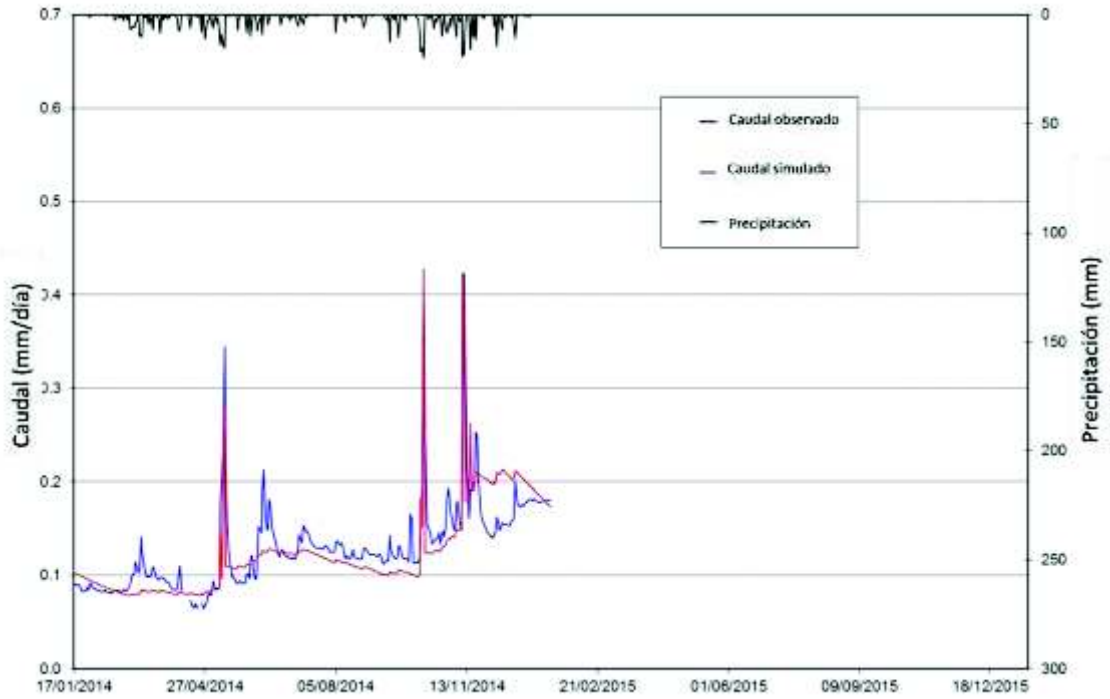


ELABORACIÓN: Autor

Los resultados iniciales de la calibración de los parámetros x1-x4 para esta cuenca (2 años), no fueron congruentes (tabla 4.7), pues el parámetro X2 de acuerdo al balance general debería indicar pérdidas por percolación (x2 negativo), por lo que se procedió a eliminar la serie del primer año para iniciar con una nueva corrida del modelo cuyos resultados obtuvieron un Nash Sutcliffe de 24.3 %, con la calibración de los parámetros de X1 (1442.24), X2 (-312.25), X3 (9084.35) y X4 (0.60); estos valores no fueron ideales para la determinación del IGF por el bajo valor del criterio de eficiencia de Nash Sutcliffe.

Posteriormente se eliminó el segundo año de la serie y se realizó la corrida del modelo desde el 17-01-2014 a 16-01-2015, obteniéndose una calibración para X1 (311.96), X2 (-275.46), X3 (2527.44) y X4 (0.50) con una un Nash Sutcliffe de 50.3 %, conforme a la figura 4.14. Con estos resultados se obtuvo el IGF referencial de la zona, pues el Nash Sutcliffe superaba el 50 %.

FIGURA 4.14 Hidrograma de caudales simulados y observados en la microcuenca uno en el periodo 17-01-2014 a 16-01-2015.

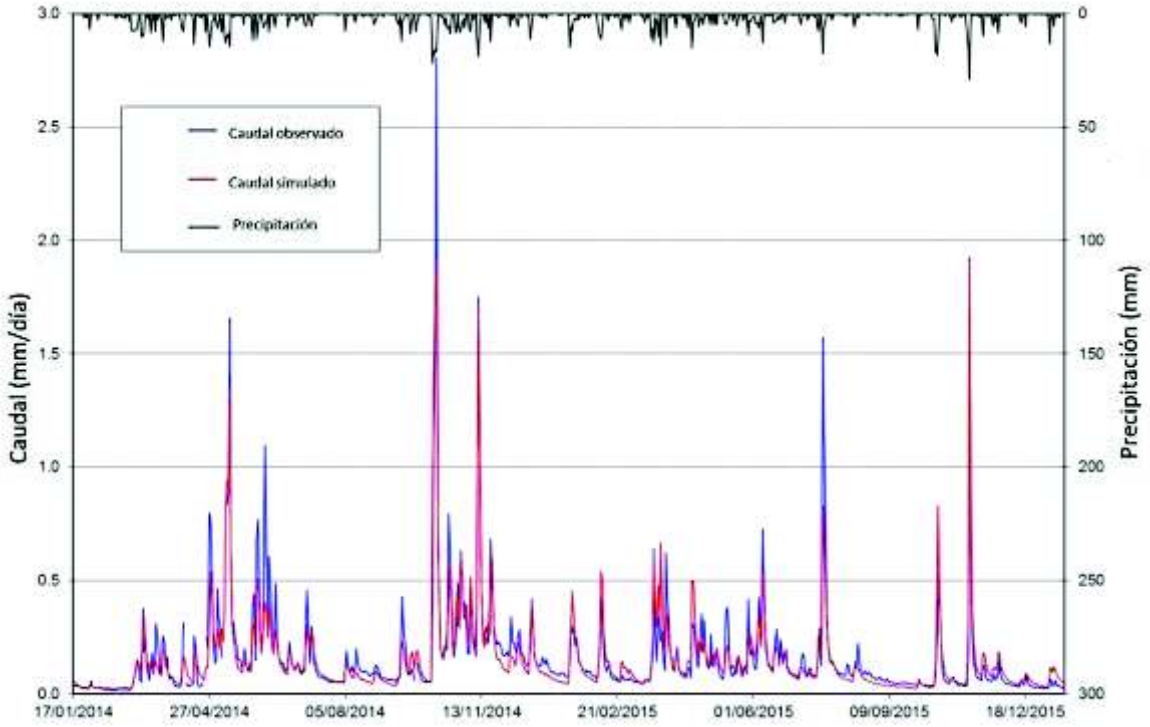


ELABORACIÓN: Autor

Microcuenca Dos JTU-M2

Los resultados de la modelación (Figura 4.15), presentan un buen ajuste entre los caudales simulados y los caudales observados (NS=78.5), se observa una buena correlación principalmente con los caudales medios de la microcuenca, lo cual indica la vialidad para el relleno de datos con el hidrograma simulado, faltantes que para esta cuenca oscilan en el 0.9 % durante el periodo de estudio. De igual manera estos resultados otorgan una mayor confiabilidad en el valor del IGF obtenido para la microcuenca.

FIGURA 4.15 Hidrograma de caudales simulados y observados en la microcuenca dos.

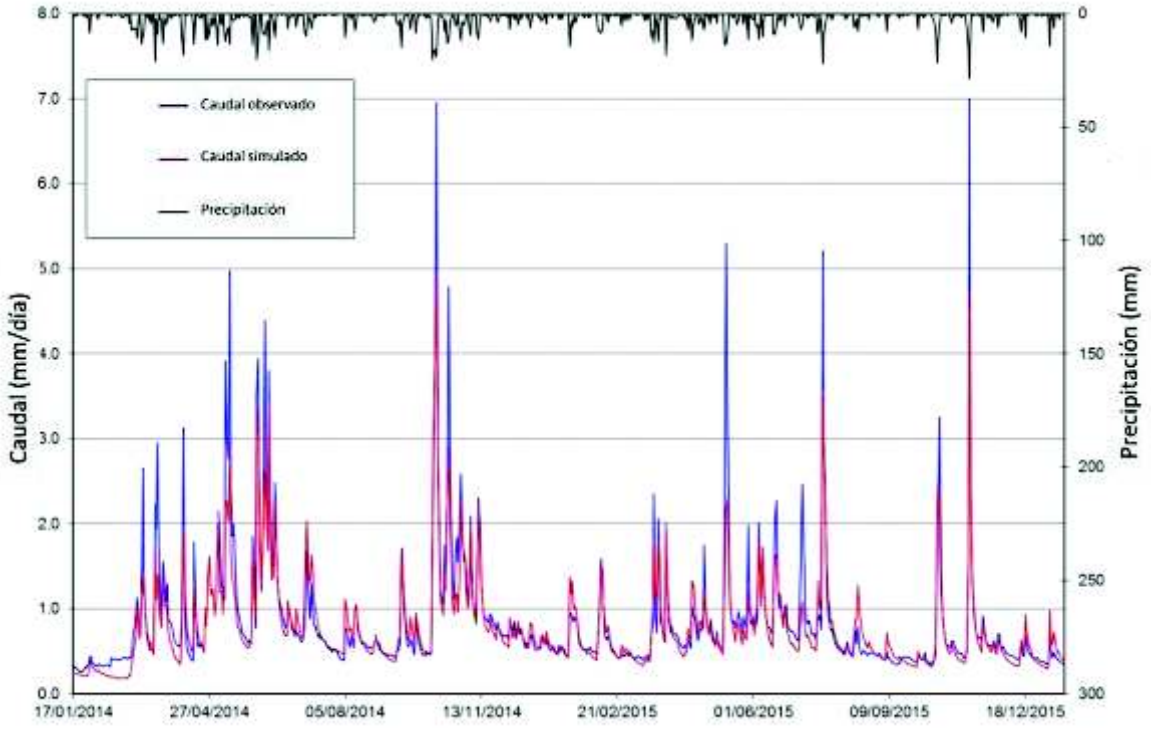


ELABORACIÓN: Autor

Microcuenca Tres JTU-M3

El NS de ajuste de los parámetros para esta microcuenca estuvo en el orden de 67.9, evidenciándose un mayor valor para el parámetro X3 (Capacidad máxima para el tránsito en canales), superior a los obtenidos para las otras microcuencas. En la serie de datos de esta microcuenca se aprecia la existencia de datos atípicos, los cuales pueden influenciar en la obtención de mejores resultados en la simulación y calibración (anexo 4). Los resultados observados en la figura 4.16 indican una buena correlación con los caudales medios, existiendo subestimación de los caudales máximos.

FIGURA 4.16 Hidrograma de caudales simulados y observados en la microcuenca tres.

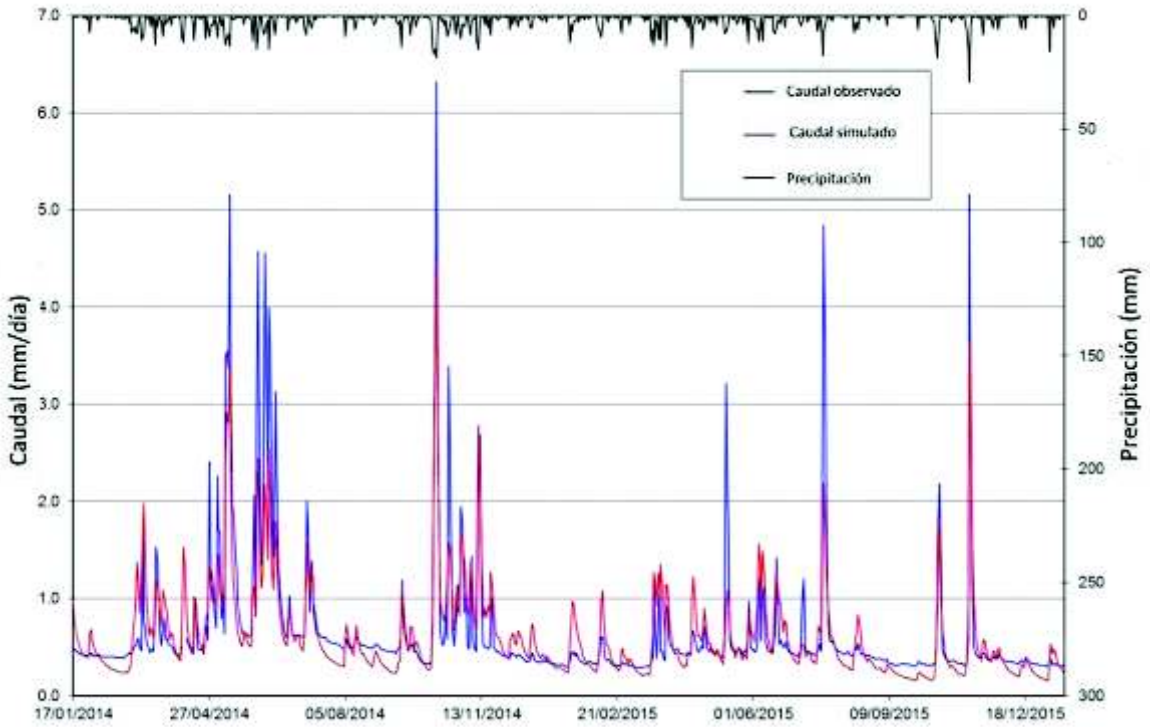


ELABORACIÓN: Autor

Unidad Experimental Jatunhuaycu JTU-Total

El NS de ajuste para la unidad experimental en estudio, estuvo en el orden de 68.8 lo cual puede estar influenciado por la existencia de datos atípicos en la serie de caudales (anexo 4), recordando además que estas zonas están expuestas a etapas de manejo (restauración-FONAG), hecho que puede estar influenciando en los datos registrados, en contraste a las microcuencas analizadas por Domínguez (2016) en Galápagos. Sin embargo los resultados de la simulación indican una buena correlación con los caudales medios (figura 4.17).

FIGURA 4.17 Hidrograma de caudales simulados y observados en la unidad experimental de estudio Jatunhuaycu.



ELABORACIÓN: Autor

4.3.2 Balance Hídrico con el Modelo

El balance hídrico de la unidad y microcuencas de estudio, obtenido con el modelo GR4J se presentan en la tabla 4.8.

TABLA 4.8 Balance Hídrico con el modelo GR4J.

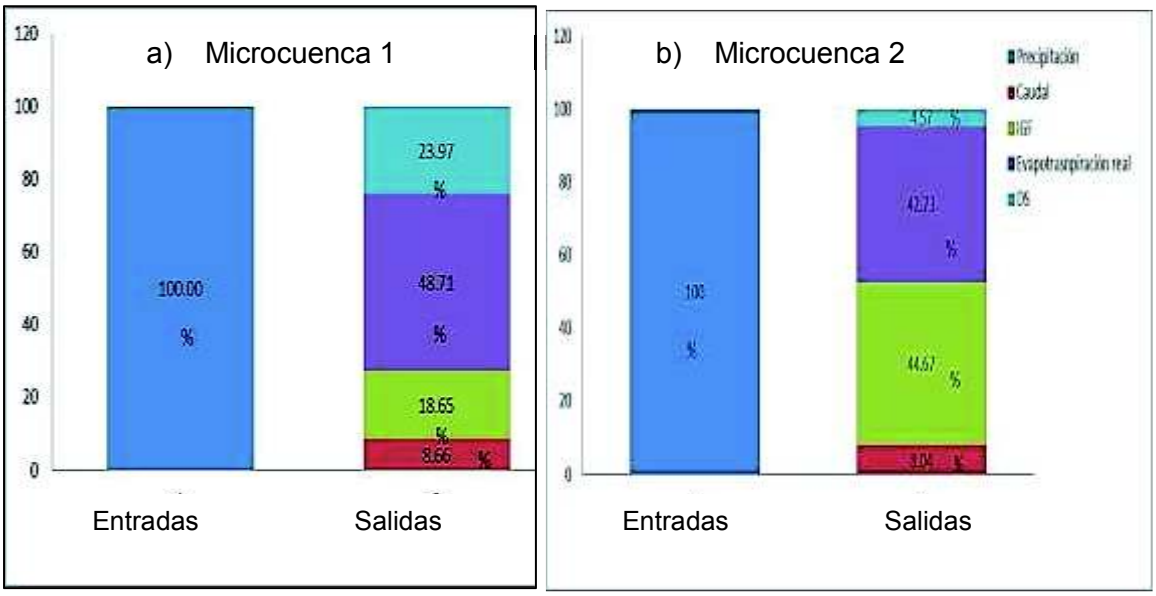
Unidad	Área (km^2)	Precipitación anual (mm)	Evapotranspiración anual (mm)	Caudal anual (mm)	IGF (mm)	ΔS (mm)
JTU-Total	15.86	762.87	318.31	239.30	-222.65	-17.39
JTU-M1	0.705	671.16	326.95	58.151	-125.15	160.90
JTU-M2	2.519	735.39	314.19	59.09	-328.50	33.60
JTU-M3	2.347	848.47	303.80	311.19	-211.09	22.38

ELABORACIÓN: Autor

Los resultados de la tabla 4.7 indican valores negativos de IGF, lo cual indica su correspondencia a salidas o pérdidas en el balance hídrico con el modelo; en el

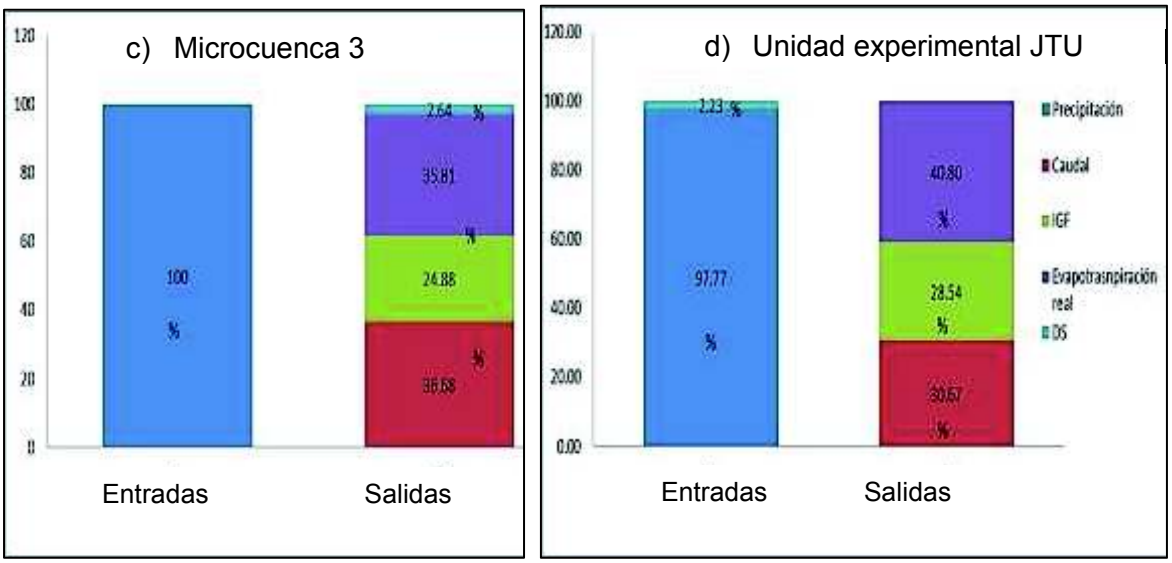
caso de ∆S negativo para JTU-Total, este indica una entrada dentro del balance conforme a lo indicado en la figura 4.19. El balance para la microcuenca uno presenta pérdidas representativas en relación a la evapotranspiración real en el en el orden del 48.71 %, para la microcuenca dos las pérdidas representativas se relacionaron con el IGF en el orden de 44.67 % y para la microcuenca tres las salidas representativas se relacionaron con el caudal, 36.68 %, lo cual es un buen indicador de la regulación hídrica, en comparación con las otras microcuencas. La unidad experimental de estudio presenta las mayores salidas en el balance en relación de la evapotranspiración real, en el orden del 40.80 %, el valor del IGF se asemeja al valor obtenido en la ecuación del balance hídrico general. La existencia de pérdidas las tres microcuencas analizadas, de acuerdo a su ubicación, indicaría que no existe aportes subterráneos entre las mismas, conforme a lo indicado en las figuras 4.18 y 4.19.

FIGURA 4.18 Balance Hídrico para las microcuencas uno (a) y dos (b).



ELABORACIÓN: Autor

FIGURA 4.19 Balance Hídrico para las microcuencas tres (c) y unidad experimental Jatunhuaycu (d).



ELABORACIÓN: Autor

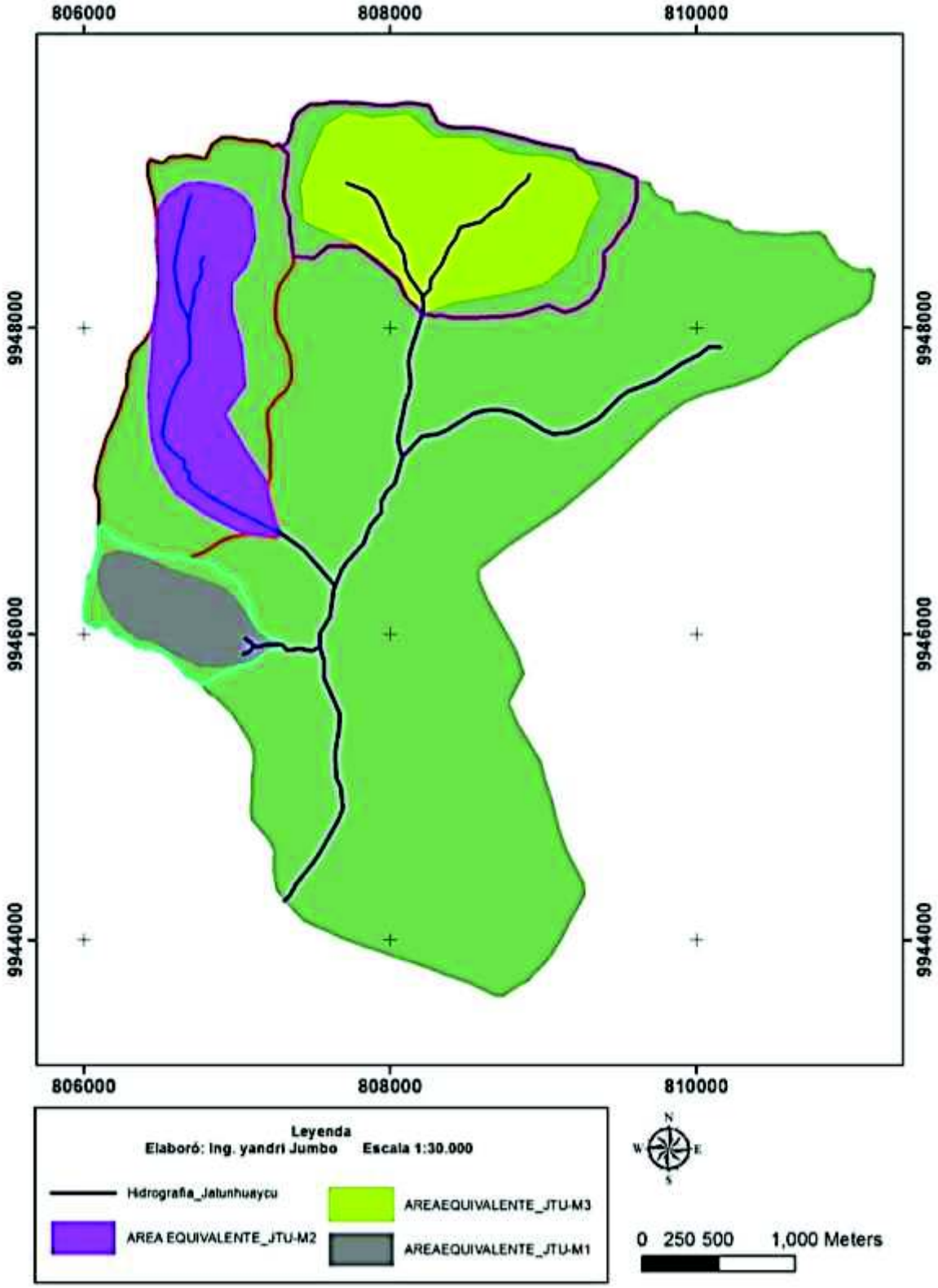
4.3.3 Factor De Corrección Del Área De Recarga Hídrica

A nivel general el modelo GR4J simula muy bien los caudales medios diarios observados de la unidad y microcuencas en estudio y conforme a la metodología indicada, permitió estimar los factores de corrección de la superficie de recarga, que para la unidad experimental Jatunhuaycu es de 0,79, expresado en una zona de recarga de 12,52 km^2, área menor a la superficie original de estudio. Las microcuencas uno, dos y tres tienen un factor de corrección de 0,73; 0,505 y 0,725, lo que indicaría zonas de recarga de 0,511; 1,272; y 1,696 km^2, respectivamente. La geología del sitio indica la presencia del acuífero Yacupamba en dirección sureste hacia la laguna “La Mica”, hecho que podría sugerir que la percolación profunda de las microcuencas en la parte alta alimenta los niveles del acuífero, cuya descarga parcial se evidencia en la captación Jatunhuaycu según la figura 4.21 y caudal específico de la parte baja de la cuenca Jatunhuaycu, considerando que su valor restante (descarga), se define como desconocido por el diaclasamiento intenso presente en la zona (Villares, 2010). Coincidentemente la diferencia de la superficie restante de la unidad experimental Jatunhuaycu (3,33 km^2 de 15,866 km^2), como resultado del producto del producto del área original por el factor de corrección (0,79), es equivalente a la

superficie que cubre el acuífero Yacupamba y las zonas Palustres y Lacustres con un valor aproximado de 3,03 km^2 dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu.

Las áreas equivalentes mostradas en la figura 4.20, son las representaciones de la magnitud encontrada, referenciales, que no representan realmente la ubicación del área efectiva de recarga, la cual puede variar en su forma y ubicación, pero con la misma área equivalente estimada. El perímetro de protección debería extenderse para toda la superficie de estas zonas, puesto que en el punto de captación que se encuentra en la parte baja de la cuenca, se aprecia aportes desde las microcuencas de la parte alta; se podría llegar a determinar tendencias sobre el área efectiva de recarga con mayor información técnico-científica en flujos subterráneos.

FIGURA 4.20 Áreas equivalentes de la unidad en estudio y sus microcuencas.



ELABORACIÓN: Autor

4.4 DISCUSIÓN SOBRE LA MODELACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

La modelación en una herramienta válida que apoya la planificación de recursos hídricos a través de la simulación de los balances de la oferta de agua (caudales), procesos naturales (evapotranspiración y percolación) con la demanda de agua, caracterizada por un sistema de captación y distribución espacial y temporal con una marcada influencia debido al crecimiento demográfico y a los efectos del cambio climático.

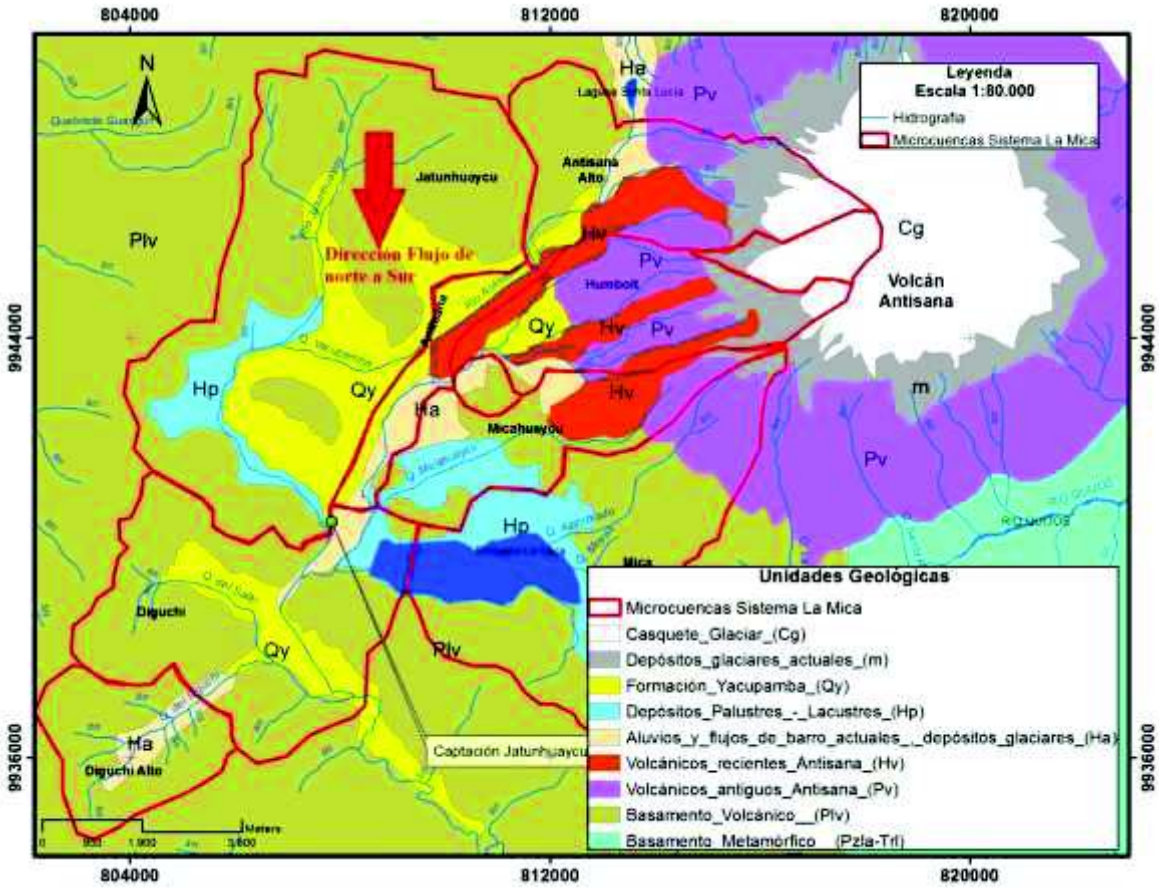
El modelo GR4J ha sido generado en diferentes condiciones de clima, desde semi-árido a templado y tropical húmedo (Perrin et al., 2003), entre ellos Francia (Le Moine et al., 2007), China (Tian et al., 2013), Colombia (Carvajal & Roldan, 2007), Australia y Estados Unidos (Oudin et al. 2005) y en este caso en el páramo de Antisana. El modelo es de código abierto, permitiendo por ejemplo a Domínguez (2016) hacer una primera estimación sobre las posibles áreas de recarga de acuíferos, que no necesariamente se encontraban dentro del límite topográfico de las cuencas hidrológicas correspondientes en la isla San Cristóbal (Galápagos) y para este caso, permitió referenciar la magnitud de las superficies equivalentes de recarga hídrica para la unidad experimental Jatunhuaycu y sus microcuencas, las cuales indicaron una superficie menor tamaño. Las pérdidas de acuerdo al balance del modelo indican percolación a niveles más profundos, debido a que en la salida de la unidad experimental Jatunhuaycu, se observa pérdidas considerables en relación al IGF. Estas pérdidas muy posiblemente están relacionadas con la geología del sitio, en la que se indica la presencia del acuífero Yacupamba en dirección sureste hacia la laguna “La Mica”, hecho que sugiere que la percolación profunda aportaría a la resiliencia del mismo y cuya descarga parcial sucede aguas abajo de la unidad de estudio, específicamente en el punto de la captación de toda la cuenca Jatunhuaycu (figura 4.21) con dirección del flujo de norte a sur.

En referencia a la ubicación del acuífero Yacupamba con dirección norte a sur (figura 4.21), el caudal de captación en la cuenca Jatunhuaycu está influenciado

por los niveles del acuífero, estimando preferentemente que las zonas de recarga del mismo, se ubican al oeste de la unidad experimental Jatunhuaycu, en toda la unidad hídrica Yacupamba, al este de la cuenca Antisana y sur de la Antisana alto, este hecho permite sugerir la conservación y recuperación de estas zonas, específicamente de pastizales degradados por su influencia en la respuesta hídrica (Ochoa *et al.,* 2016).

El agua de esta zona tiene menor cantidad de sodio y potasio, pero presentan mayor cantidad de carbonatos y tienen una tendencia de crecimiento en sulfatos y cloruros, hacia el centro del área de estudio, por lo que se define como aguas que no han permanecido mucho tiempo en el subsuelo debido a que presentan buena cantidad de carbonatos (Alvarado, 2009). Está condición indicaría la alta transmisividad del acuífero y su capacidad de alimentar aguas abajo el afloramiento de vertientes, por lo que el manejo deberá priorizar las zonas de influencia sobre el acuífero para la conservación del recurso previo a su aprovechamiento en la captación, así mismo deberá enfocarse el manejo en las zonas en las que se observa mayor precipitación y menor regulación hídrica, a través de la generación de materia orgánica, la cual específicamente se relaciona con la dinámica de la biomasa y carbono; se puede aprovechar la iniciativas como la de huella de carbono y huella hídrica a nivel local para la obtención de recursos económicos.

FIGURA 4.21 Ubicación de las cuencas aportantes al sistema “La Mica” Quito Sur, flecha indicativa de la dirección del flujo subterráneo.



FUENTE: (Alvarado, 2009)

ELABORACIÓN: Autor

4.5 COMPARACIONES DEL MODELO CON OTROS TRABAJOS RELACIONADOS

Según Carvajal & Roldán (2007), en la modelación hidrológica de la cuenca del río Aburrá, en Colombia, en las diferentes cuencas en las que se calibró el modelo, se encontró al igual que en este estudio, la limitación del modelo para representar eventos máximos, esto debido a que con el criterio de eficiencia usado (máximo) en ambos casos, se favorece la simulación del caudal base, similar a lo presentado por Carvajal & Roldán (2007).

En la misma comparación con los resultados en Jatunhuaycu, en todos los casos el valor obtenido para el parámetro x1 (máxima capacidad del tanque de

producción) es considerablemente alto, comparado con los resultados de Carvajal & Roldán (2007) con valores de 1226 a 3299 mm.

El modelo GR4J representa satisfactoriamente la serie de caudales diarios, especialmente la tendencia de estos y los caudales mínimos para análisis de sequías así como para realizar balances hídricos. Los valores de los criterios de eficiencia comúnmente aceptados se encuentran entre el 50 y 100%, lo que muestra el potencial del modelo para calibrarlo y usarlo en nuestro medio; los resultados en la unidad experimental Jatunhuaycu muestra valores entre 53 y 78 %.

Domínguez (2016), mediante el uso del GR4J, GR7J (modelo de 7 parámetros) realizó el primer estudio del funcionamiento hidrogeológico de las cuencas hidrográficas en el lado meridional del barlovento de la isla de San Cristóbal, la cual es la única isla en el archipiélago de Galápagos con recursos permanentes de agua dulce; las cuencas de El Bayo a 607 msnm y dos a media elevación, Chuki Marka y Cerro Gato, a 320 y 373 msnm, respectivamente.

Los resultados permitieron definir en una escala de cuenca hidrográfica, que la recarga es más afectada conforme aumenta la gradiente altitudinal por la diferencia en la cantidad de precipitación. Domínguez (2016), simuló el flujo en las tres cuencas para caracterizar el comportamiento hidrodinámico, mostrando que las pérdidas de las cuencas de elevación alta (por encima de 400 m de elevación) se convierten en aportes de agua subterránea en las cuencas de altura media (por debajo de 400 m de elevación), mientras que para el caso de Jatunhuaycu, las pérdidas no se muestran en el punto de aforo en la salida de la unidad experimental, sin embargo en base a los aforos realizados, se aprecia la posible descarga de flujo subterráneo conforme disminuye el gradiente altitudinal aguas debajo de la cuenca Jatunhuaycu, por lo que los resultados mostrados por Domínguez (2013) podrían evidenciarse en la cuenca Jatunhuaycu mediante el monitoreo del caudal de la cuenca en el punto de captación de la EPMAPS. Las microcuencas anidadas mostraron pérdidas en cada caso, definiéndose áreas equivalente de recarga hídrica menores al área de las microcuencas, cuya

percolación, se relacionó con el acuífero Yacupamba, determinado en el sitio (Alvarado, 2009), sugiriendo el manejo específico de estas áreas en las cercanías de las zonas riparias, zonas en las que ocurre preferentemente la descarga del flujo subsuperficial.

Resumen del capítulo

Los resultados obtenidos en el periodo 17/01/2014 a 16/01/2016 indican que la precipitación anual dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu (JTU-Total) se distribuye desde los 665 mm en la parte baja hasta los 889 mm en la parte alta, la variación de la precipitación media diaria correspondió a 1,9 mm día^{-1} en la parte baja hasta los 2,5 mm día^{-1}. La ETR media anual varía entre 303,8 y 351,7 mm, observándose diferencias significativas en relación al gradiente altitudinal (temperatura), el cual varía de 4000 msnm en la parte baja a 4615 msnm en la parte alta. Los caudales en la microcuenca uno JTU-M1 presentan un promedio de 1,30 l/s; en la microcuenca dos JTU-M2 de 4,72 l/s, en la microcuenca tres JTU-M3 de 23,16 l/s y en la unidad experimental JTU-Total un promedio de 120, 39 l/s. Se observa una considerable diferencia en el caudal específico entre las microcuencas en estudio, relacionando su regulación con contenidos de materia orgánica. De los resultados obtenidos en el balance hídrico, la microcuenca dos es la que presenta una mayor percolación (49,23 %) en contraste la microcuenca tres (27,51 %), a pesar de tener una superficie aproximada en tamaño; la percolación para la microcuenca uno es del 42,62 % y para la unidad experimental en su conjunto es de 26,90 % del total de la precipitación.

De los resultados de la modelación con el GR4J, la simulación de caudales mediante el criterio de eficiencia de Nash Sutcliffe, obtuvo valores del 53 al 78 %, considerados aceptables para este tipo de modelación. GR4J permitió estimar los factores de corrección de la superficie de recarga, que para la unidad experimental Jatunhuaycu es de 0,79, expresado en una zona de recarga de 12,52 km^2; las microcuencas uno, dos y tres tienen un factor de corrección de 0,73; 0,505 y 0,725, lo que indicaría zonas de recarga de 0,511; 1,272; y 1,696 km^2, respectivamente. La geología del sitio indica la presencia del acuífero Yacupamba en dirección norte sur hacia la laguna “La Mica”, hecho que sugiere que su recarga se da con percolación profunda de las microcuencas en la parte alta, cuya descarga parcial se evidencia en la captación Jatunhuaycu, en la salida de toda la cuenca Jatunhuaycu (40,96 km^2).

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de la modelación en la unidad experimental Jatunhuaycu indican que la producción hídrica al interior se relaciona con una superficie equivalente de recarga menor en relación a la superficie topográfica de las microcuencas y unidad experimental de estudio. La existencia de un acuífero en la zona, sugeriría la recarga del mismo con la percolación profunda de las cuencas de mayor altitud. Los perímetros de protección a nivel de la unidad de estudio Jatunhuaycu y sus microcuencas, están relacionados directamente con el límite de las áreas equivalentes obtenidas en este estudio en magnitud, las cuales serían referenciales; para conocer con mayor precisión el área efectiva de recarga deberá trabajarse con un modelo distribuido de la estructura vertical del suelo.

5.1 CONCLUSIONES

Con respecto al Objetivo General

El modelo GR4J permitió simular satisfactoriamente los caudales diarios con criterios de eficiencia sobre el 50 al 78 %, de esta forma se evidenció que la producción hídrica de las microcuencas y unidad experimental de estudio no corresponde a la configuración topográfica clásica, más bien está relacionada a las formaciones geológicas presentes en la zona, indicando una superficie de recarga menor en correspondencia a los caudales registrados; los perímetros de protección están relacionados con el contorno de las áreas equivalentes de recarga para el flujo superficial y con las zonas de alta percolación para la resiliencia de acuíferos, cuya descarga se evidencia conforme a la disminución del gradiente altitudinal.

Con respecto al Objetivo Específico Uno:

La precipitación en la unidad experimental Jatunhuaycu es característica de las zonas de páramo, con valores de 665 mm en la parte baja hasta los 889 mm en la

parte alta, presentando alta frecuencia y baja intensidad, existiendo alta probabilidad de retención de humedad en el suelo en relación al elevado contenido de materia orgánica (Torres, 2016), evidenciándose diferencias significativas de acuerdo al nivel de degradación caracterizado dentro de la unidad experimental (PRAA & CONDESAN, 2013) y las formaciones vegetales existentes como humedales, pajonales, arbustos, etc.

La evapotranspiración real dentro de la cuenca presenta fluctuaciones en relación a la temperatura del gradiente altitudinal, a las condiciones de nubosidad, radiación solar y al tipo de cobertura vegetal existente con valores desde 303,80 mm a 326,95 mm al año.

Los caudales específicos para las microcuencas uno, dos y tres, varían desde 1,84; 1,87 y 9,867 l/s/km^2, respectivamente. El caudal específico para la unidad experimental Jatunhuaycu es de y 7,588 l/s/km^2. La microcuenca tres presenta un mayor caudal específico, lo cual estaría relacionado a los altos contenidos de materia orgánica en el suelo con valores de 16,26 a 26,59 % que cubren más del 90 % de la superficie de la microcuenca (Jumbo & Torres, 2016), esta relación indicaría una mejor regulación hidrológica en el tiempo, de acuerdo con la correlación obtenida por Torres (2016).

El balance hídrico con el modelo indica que la percolación de las microcuencas en la parte alta, no aporta al caudal de la unidad experimental Jatunhuaycu, por lo que sugiere que su recarga ocurre aguas más debajo de la cuenca Jatunhuaycu. El valor del IGF indica que no existe aportes de flujo subterráneo entre las microcuencas.

Con respecto al Objetivo Específico Dos:

El modelo simula muy bien los caudales medios reales de la unidad y microcuencas en estudio y permitió estimar los factores de corrección de la superficie de recarga que para la unidad experimental Jatunhuaycu es de 0,79 lo que correspondería a una superficie total de 12,52 km^2. Coincidentemente la superficie restante (3,33 km^2) es equivalente a la superficie que cubre el acuífero

Yacupamba y las zonas Palustres y Lacustres con un valor aproximado de 3,03 km^2 dentro de la unidad experimental Jatunhuaycu.

Las microcuencas uno, dos y tres tienen un factor de corrección de 0,73; 0,505 y 0,725, lo que indicaría zonas de recarga de 0,511; 1,272; y 1,696 km^2, respectivamente. Las microcuencas dos y tres tienen un área en superficie relativamente equivalente, sin embargo su producción en caudal de la microcuenca tres es un 80% superior, evidenciándose además el buen estado de conservación de esta zona (Aguirre & Torres, 2013).

La geología de la zona indica que el 17,90 % de la superficie de toda la unidad de estudio está contenida en la formación Yacupamba, acuífero de elevada transmisividad, multicapas de arenas permeables, flujos de lodo y aluviales, valor sumado al 1,22 % de depósitos palustres y lacustres (Alvarado, 2009), se relaciona con la superficie equivalente obtenida con el uso del modelo (78,90 %).

La dirección del flujo subterráneo tendría un sentido norte-sur en relación a la formación Yacupamba, los coeficientes de escorrentía registrados a nivel de sus microcuencas con variaciones de 0,08 y 0,37 (Ochoa *et al.,* 2016) y para la unidad experimental de 0,28 (Ochoa *et al.,* 2016) y 0,34 (Andrade, 1996), indicarían un menor volumen de agua escurrida y un mayor de agua infiltrada; los altos valores de coeficientes de escorrentía obtenidos por otros autores para esta zona (Andrade, 1996), indicarían que no existe aporte de cuencas vecinas específicamente al caudal de la unidad experimental Jatunhuaycu.

Con respecto al Objetivo Específico Tres:

Las zonas de recarga de las microcuencas anidadas estarían relacionadas con la ubicación de las zonas riparias, mientras que para la unidad experimental Jatunhuaycu, esta estaría ubicada preferentemente al lado oeste, sobre el acuífero de Yacupamba, por lo que las zonas de manejo a nivel de superficie deberán enfocarse en la recuperación de las zonas degradadas (PRAA & CONDESAN, 2013) con prioridad a zonas desprovistas de vegetación y con mayor porcentaje de pendiente topográfica (figura 2.3).

Sin embargo, la percolación de la unidad de experimental Jatunhuaycu y de la unidad hídrica adyacente, Yacupamba, aportarían significativamente al caudal de toda la cuenca Jatunhuaycu (40,94 km^2) en el punto de captación de la EPMAPS, relacionado al caudal específico que para la parte baja de la cuenca (15,71 km^2) correspondería a 9,24 $l/s/km^2$; superior al de la unidad Jatunhuaycu (7,588 $l/s/km^2$) en un área equivalente (15,86 km^2) y en relación a las formaciones geológicas caracterizadas en la zona (Alvarado, 2009) desde en la parte media - alta.

La propuesta de manejo para el caudal de captación de la EPMAPS en toda la cuenca Jatunhuaycu deberá realizarse en relación a la formación geológica Yacupamba, la cual comprendería el lado este de la cuenca Jatunhuaycu, parte oeste de la cuenca Antisana y parte sur de la cuenca Antisana Alto, interviniendo estas mediante la restauración activa de las zonas degradadas (especies nativas), intervención biofísica y mejorando las condiciones de las zonas conservadas mediante la restauración pasiva (figura 4.21). En las zonas indicadas para el manejo predominan los pastizales degradados, por lo que en un escenario de recuperación a un sistema conservado, las magnitudes de flujo promedio y alto podrían asemejarse hasta seis veces mayores y caudales altos hasta 14 veces mayores (Ochoa *et al.,* 2016).

5.2 RECOMENDACIONES

Para obtener una mejor simulación de los caudales con el uso del GR4J, se recomienda el uso de una serie con mayores registros de datos en el tiempo, en los que se pueda obtener una mejor calibración de los parámetros del modelo.

Para conocer con mayor precisión el área efectiva de recarga de la unidad experimental y sus microcuencas, deberá trabajarse con un modelo distribuido de la estructura vertical del suelo, ya que el modelo utilizado es limitado, pero que puede determinar superficies equivalentes.

Los resultados de modelación en la microcuenca dos y tres permiten efectuar el relleno datos de caudal en los días faltantes, por sus altos valores del criterio de eficiencia Nash-Sutcliffe.

Los entes relacionados con el manejo de las zonas de recarga, FONAG, EPMAPS, MAE podrán influir en las áreas superficiales sobre el acuífero Yacupamba, mediante la recuperación de las zonas degradadas con el uso de especies nativas y protección de las zonas en buen estado de conservación, en las que según (Aguirre & Torres, 2013) se cumple con las funciones ecosistémicas.

Finalmente se recomienda la realización de un estudio con trazadores e isotopos con el objeto de conocer la dirección y destino final de la lámina de percolación desde las zonas de recarga con mayor rango altitudinal.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, N., & Torres, J. (2013). Informe de la línea base del estado de degradación de los páramos de Jatunhuayco: escenario de degradación y caracterización de sistemas de referencia. Quito: Fondo de Protección del Agua FONAG.

Aguirre, N., Torres, J., & Velasco, P. (2013). Guía para la restauración ecológica en los páramos del Antisana. Volumen I, 9-13 pp. Quito, Ecuador: Fondo de protección del agua FONAG.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura FAO.

Alvarado, C. (2009). Caracterización hidrogeológica de las vertientes occidentales del volcán Antisana como parte de los estudios de los glaciares y páramos frente al cambio climático. Tesis de pregrado. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.

Andrade, L. (1996). Escenarios Hidrológicos en la Mica. Memorias del Seminario Montañas, glaciares y cambios climáticos. (pp. 23-40). Escuela Politécnica Nacional - Orstom Fundacyt.

Antisana, F. (2002). Plan de Manejo Reserva Ecológica Antisana. 242 pp. Ecuador: Ministerio del Ambiente.

Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., innocenti, F., Navarro, J., & Santacroce, R. (1998). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. Geological Magazine, 125(1), 1-14.

Bateman, A. (2007). Hidrología Básica y Aplicada. Murcia, España: Universidad Politécnica de Cartagena.

Black, J. (1982). Los páramos del Antisana. Revista Geográfica Quito, 17:25–52.

Buytaert, W. (2004). The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology. Ph.D. thesis. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences.

Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2006a). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). Geomorphology, 73, 207–221.

Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bièvre, B., & Wyseure, G. (2006b). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. Journal of Hidrology, 329, 413-421.

Buytaert, W., Iñiguez, V., & Célleri, R. (s.f.). (2006c). Analysis of the water balance of small páramo catchments in south Ecuador. Environ. Role Wetl. Headwaters 271–281.

Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2007). Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. CATENA 70, 143–154.

Calispa, M. (2010). Modelación hidrológica de glaciares y páramos en relación con la oferta de agua de Quito. Tesis de pregrado. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Carvajal, L., & Roldan, E. (2007). Calibration of GR4J lumped rainfall-runoff model application: Rio aburra cachtment. DYNA, 74(152), 73-87.

Castellano, P., & Serrato, C. (2008). Diversidad de Macroinvertebrados Acuáticos en el Nacimiento del río en el páramo. 80. Norte de Santander, Colombia.

Cruz, F. (2000). Fundamentos cientificos de los modelos. Mexico: Instituto Politecnico Nacional.

Dinerstein, E., Olson, D. M., Graham, D. J., Webster, A. L., Primm, S. A., Bookbinder, M. P., & Ledec, G. (1995). A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean. World Wildlife Fundation.

Domenico, P., & Schwartz, F. (1990). Physical and Chemical Hydrogeology. New York, EE. UU.: John Wiley and Sons.

Domínguez, C. (2016). Integrated hydrogeological study of San Cristobal Island (Galapagos). Tesis de doctorado. Université Pierre et Marie Curie.

Eslaba, J. (1992). Perfil altitudinal de la temperatura del aire en Colombia. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Geofísicas.

Favier, V., Coudrain, A., Cadier, E., Francou, B., Ayabaca, E., Maisincho, L., . . . Wagnon, P. (2008). Evidence of groundwater flow on Antizana ice-covered volcano, Ecuador / Mise en evidence d'écoulements souterrains sur le volcan englacé Antizana, Equateur. Hydrol. Sci. J. , 53, 278–291.

Federal Water Pollution Control Administration. (1967). Temperature and Aquatic Life . Cincinnati, Ohio, Estados Unidos: Laboratory Investigations.

Fisher, H., List, E., Koh, R., Imberger, J., & Brooks, N. (1979). Mixing in inland and coastal waters. New York: Academic Press.

G, m., & I, E. (s.f.). Geolatitud. Obtenido de http://www.geoinvestigacion.gob.ec

García, D., & Jiménez, F. (2010). Reglas formales y no formales de gobernanza del recurso hídrico en la subcuenca del río Ulí. Revista Recursos Naturales y Ambiente CATIE (Número 59-60), 17-26.

Garreaud, R. (2009). "The Andes climate and weather. Advances in Geosciences, 3-11.

Grimaldos, M. (2013). Herramienta computacional para la estimación del balance hidrológico de largo plazo utilizando Arcgis 10.1. Tesis de postgrado. Bogotá, Colombia: ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO.

Guevara, G. (2014). Evaluación ambiental estratégica para cuencas prioritarias de los Andes colombianos: dilemas, desafíos y necesidades. Acta Biológica Colombiana, 19(1):11-24.

Gutiérrez, B., & García, D. (s.f.). Modelazación térmica de los ríos Cea y Manzanares. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Guzmán, P., Batelaan, O., Huysmans, M., & Wyseure, G. (2015). Comparative analysis of baseflow characteristics of two Andean catchments, Ecuador. Hydrology. Process. 29, 3051–3064.

Hazen, P., & Sawyer, C. (2011). Resumen Ejecutivo Plan Maestro de Agua Potable. Quito: Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito EPMAPS.

Hernández, R. (2001). Comparación de Métodos de kriging Multivariante para la estimación espacial de la temperatura del aire. España: Departamento de Geografía. Universidad del país Vasco.

Hincapié, E., & Tobón, C. (2012). Dinámica del Agua en Andisoles Bajo Condiciones de Ladera. Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín, vol. 65, núm. 2, pp. 6771-6783.

Hofstede, R., Segarra, P., & Vásconez, P. (2003). Los Páramos del Mundo. Proyectos Atlas Mundial de los Páramos. Quito, Ecuador.

Jha, R., Ojha, C., & Bhatia, K. (2007). Development of Refined BOD and DO Models for Highly Polluted Kali River in India. India. Obtenido de http://www.aseanenvironment.info/Abstract/41015921.pdf

Jones, S., Wraith, J., & Or, D. (2012). Time domain reflectometry measurement principles and applications. Hydrol. Process., Issue 16 , 141-153.

Jorquera, E., Weber, J., & Reyna, M. (2011). Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. Research Gate, 18 pp.

Jumbo, Y., & Torres, S. (2016). Informe técnico de la interpolación de los resultados del muestreo de suelos en Jatunhuaycu. Quito: Fondo para la protección del Agua FONAG.

Le Moine, N., Andréassian, V., Perrin, C., & Michel, C. (2007). How can rainfall-runoff models handle intercatchment groundwater flows ?, Theoretical study based on 1040 French catchments. Francia: Water Resour Res.

Llorca, R., & Bautista Carrascosa, I. (2006). Prácticas de atmósfera, suelo y agua. Valencia: Editorial de la UPV.

Mancera Pineda, J. E., Peña Salamanca, E. J., Giraldo, R., & Santos Matínez, A. (2003). Introducción a la modelación ecológica, principios y aplicación. Colombia: CATGRAPHICS S.A.

Martín, M. (2013). Calibración y modelación hidrológica preliminar con énfasis en el ordenamiento y control de datos . Tesis de pregrado . Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.

Microsoft. (10 de Julio de 2017). Support Office. Obtenido de https://support.office.com/es-es/article/

Monsalve, G. (1995). Hidrología en la Ingeniería. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Montoya, Y., & Montoya, B. (2009). Caracterización morfométrica de la microcuenca de la quebrada los Andes, El Carmen de Viboral, Antioquia-Colombia. Revista Ingenierías Universidad de Medellín(8), 31-38.

Morin, G., & Couillard, D. (1990). Predicting river temperatures with a hydrological model.

Ochoa, B., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., & Gil-Ríos, J. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. 30(22), 4074-4089. Hydrological Processes.

Orozco, G. (s.f.). Los modelos de simulación como herramientas de gestión del recurso hídrico. Recuperado el 15 de Enero de 2013, de https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005609/Memoriashtm/Viernes/Gestiondeaguas/44.htm

Oudin, L., Hervieu, F. M., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. Journal of Hydrology, (303), 290-306.

Pabón, J., J, E., & R, G. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. Bogotá, Colombia: Meteorol. Colomb. 4:47-59. .

Pazmiño, A. (2010). Variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones en zonas de montaña: caso del volcán Antisana. Tesis de pregrado. Escuela Politécnica Nacional.

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 279(1), 275-289.

Pita, S., & Pértega, s. (17 de julio de 2017). Relación entre variables cuantitativas. Obtenido de Fisterra: http://www.fisterra.com/gestor/upload/guias/var_cuantitativas2.pdf

PRAA, & CONDESAN. (2013). Restauración Páramos Antisana. Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador.

Soria, I. (2016). Evaluación de la calidad ecológica del río Jatunhuayco en la zona asociada a la captación Jatunhuayco (EPMAPS) utilizando comunidades de macroinvertabrados como indicadores de la calidad del agua. Proyecto Previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental, 55. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.

Sotelo, G. (1989). Hidráulica General – Fundamentos. Mexico: LIMUSA. México.

Soto, J. (2007). Servicios ambientales, agua y economía., (26). Revista de ingeniería Universidad de los Andes Bogotá, 26-33.

Thoman, R., & Mueller, J. (1987). Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. New York.

Tian, Y., Xu, Y. P., & Zhang, X. (2013). Assessment of climate change impacts on river high flows through comparative use of GR4J, HBV and Xinanjiang models. . Water resources management, 27(8), 2871-2888.

Torres, S. (2016). Parámetros de Control de la Dinámica Hidrológica del Páramo en Antisana – Ecuador. Tesis de postgrado. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Velarde, E., & Camones, A. (2015). Influencia de la humedad del suelo en la relación precipitación-escorrentía en las cuencas del Anya y Mchique en Juníin, Perú. V Congreso Nacional, IV Congreso Iberoamericano de riego y drenaje (pág. 26). Lima, Perú: Universidad de la Molina.

Vélez, J. (2013). Estrategia de simulación hidrológica distribuida: integración conceptual de hidrología. Revista Acadèmica Colombiana de Ciencias, 37 (144): 393-409.

Villares, F. (2010). Estudi Geovulcanológico de la zona sur de la Caldera Chacana Provincias de Napo y Pichincha. Tesis de pregrado. Quito, Ecuador: Escuela Politéncica Nacional.

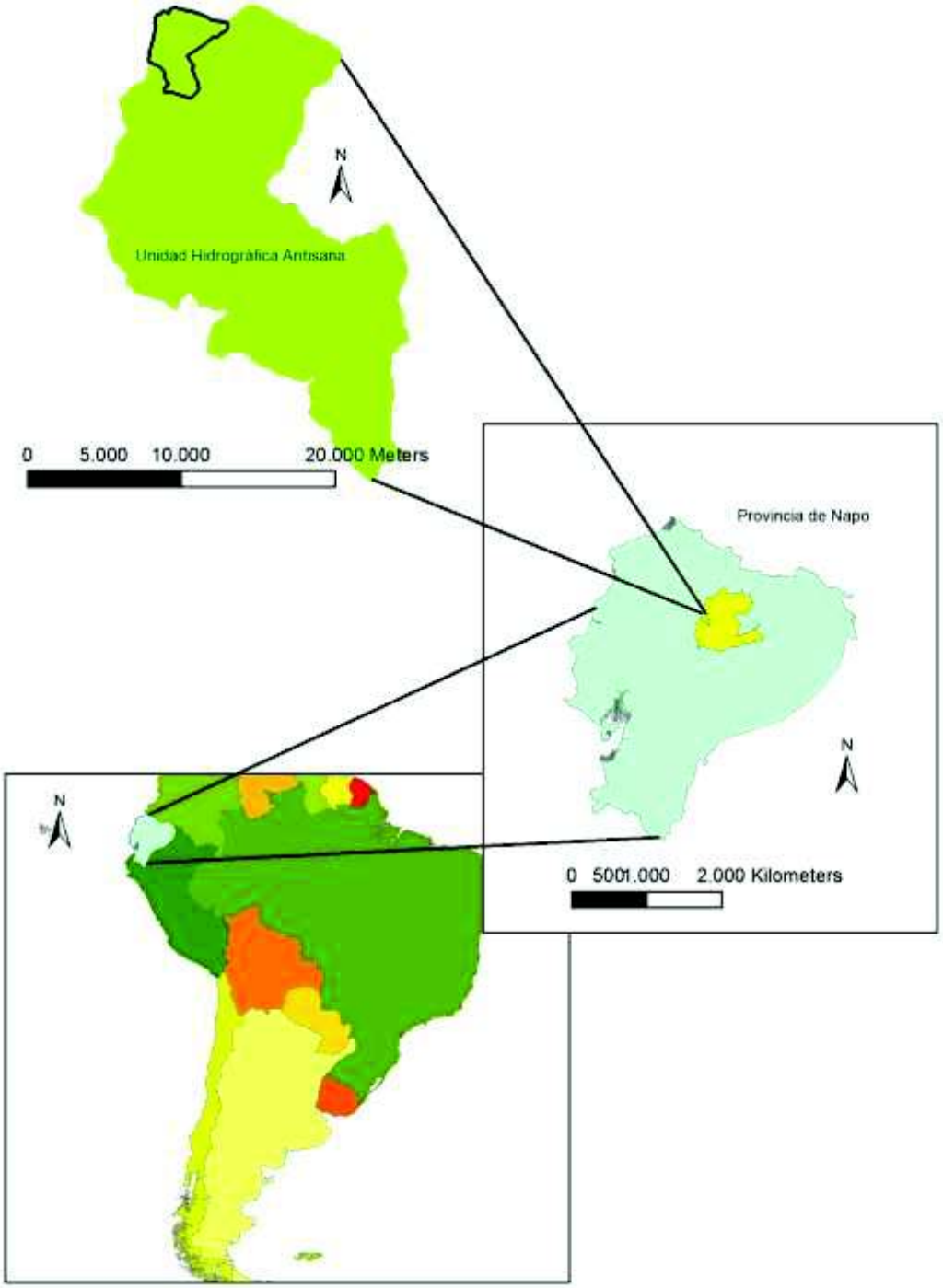
Webb, B., & Zhang, Y. (1997). Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget.

Yépez, V. (2016). Bases y criterios para la determinación de caudales ecológicos en ríos altoandinos tropicales. Tesis de postgrado. Quito, Ecuador.

ANEXO

ANEXO N° 1

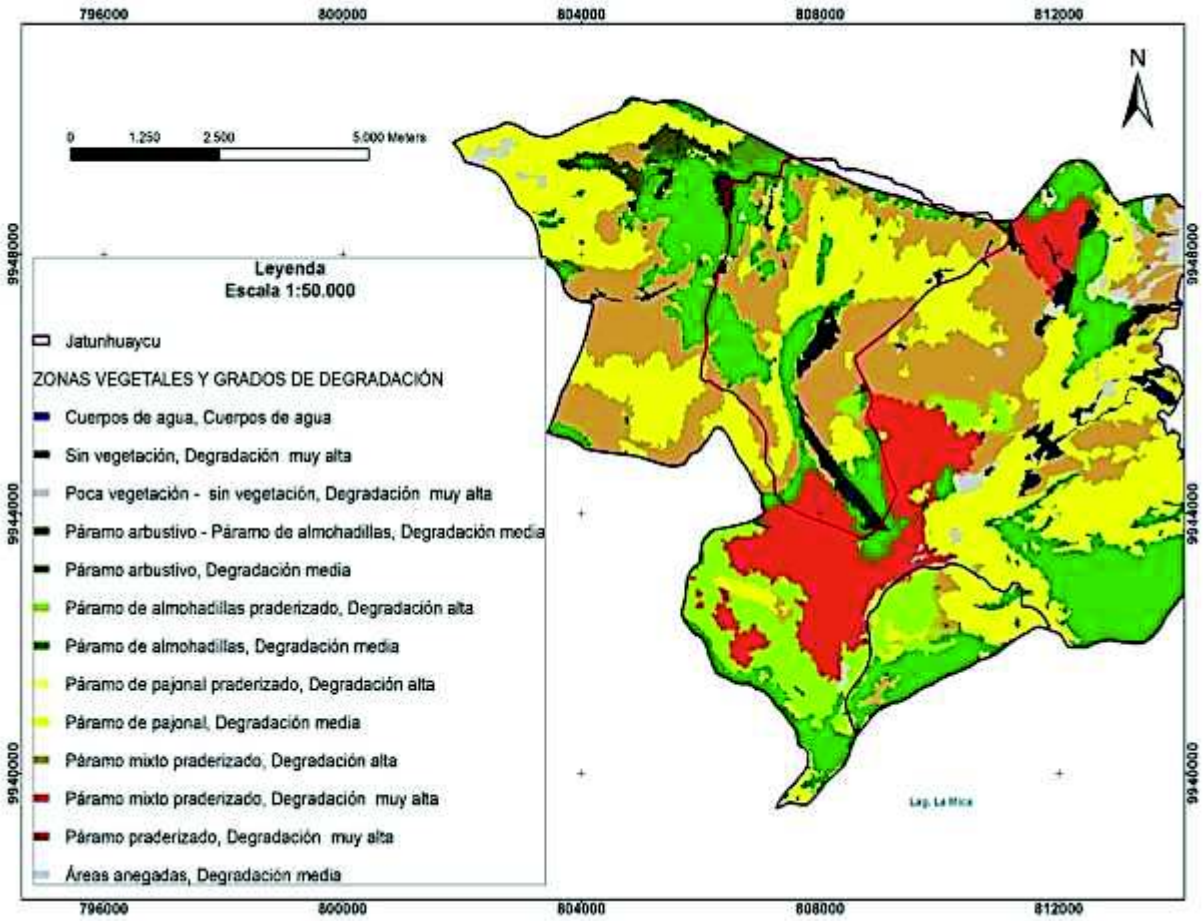
Ubicación de la Unidad experimental Jatunhuaycu a nivel de cuenca, provincia y país.



ELABORACIÓN: Autor

ANEXO N° 2

Ubicación de la unidad experimental Jatunhuaycu dentro del Área de Conservación Hídrica Antisana ACHA, prioridades de zonas de restauración.



FUENTE: (PRAA & CONDESAN, 2013)

ANEXO N° 3

Ejemplos de ecuaciones diarias obtenidas de la relación temperatura y altitud con estaciones sobre los 3000 msnm.

FECHA	Altitud Hum-boldt	constante a	constante b	T máx. estimada	T máx. real Humboldt	(e) Residuo y-y`	T máx. calibrada
17/01/2014	4000	-0.0097	49.1425	10.2682	11.27	1.0018	11.27
18/01/2014	4000	-0.0103	48.6683	7.5185	10.03	2.5115	10.03
19/01/2014	4000	-0.0092	46.2519	9.5488	11.32	1.7712	11.32
20/01/2014	4000	-0.0051	31.7236	11.2890	11.41	0.1210	11.41
21/01/2014	4000	-0.0104	53.5384	12.0509	12.27	0.2191	12.27
22/01/2014	4000	-0.0076	42.3125	11.7130	12.14	0.4270	12.14
23/01/2014	4000	-0.0100	52.2594	12.2839	12.04	-0.2439	12.04
24/01/2014	4000	-0.0103	53.4684	12.2504	12.41	0.1596	12.41
25/01/2014	4000	-0.0109	55.6466	12.1254	12.37	0.2446	12.37
26/01/2014	4000	-0.0117	56.3640	9.6673	11.03	1.3627	11.03
27/01/2014	4000	-0.0096	50.1024	11.6074	10.62	-0.9874	10.62
28/01/2014	4000	-0.0093	48.2291	11.1461	10.06	-1.0861	10.06
29/01/2014	4000	-0.0094	47.2085	9.6337	8.66	-0.9737	8.66
30/01/2014	4000	-0.0088	45.1441	9.7485	9.23	-0.5185	9.23
31/01/2014	4000	-0.0102	51.1795	10.2332	10.46	0.2268	10.46
01/02/2014	4000	-0.0115	57.5397	11.7052	11.05	-0.6552	11.05
02/02/2014	4000	-0.0112	56.4367	11.7938	11.26	-0.5338	11.26
03/02/2014	4000	-0.0096	50.4401	12.1261	12.55	0.4239	12.55
04/02/2014	4000	-0.0080	43.5272	11.4567	12.55	1.0933	12.55
05/02/2014	4000	-0.0077	38.4630	7.6673	7.67	0.0027	7.67
06/02/2014	4000	-0.0101	52.0507	11.7123	11.25	-0.4623	11.25
07/02/2014	4000	-0.0090	47.5551	11.5361	12.02	0.4839	12.02
08/02/2014	4000	-0.0040	25.1838	9.2693	10.58	1.3107	10.58
09/02/2014	4000	-0.0097	50.1318	11.1537	10.82	-0.3337	10.82
10/02/2014	4000	-0.0060	33.0314	8.9257	10.63	1.7043	10.63
11/02/2014	4000	-0.0098	47.5239	8.3970	10.29	1.8930	10.29
12/02/2014	4000	-0.0074	40.4604	11.0030	10.87	-0.1330	10.87
13/02/2014	4000	-0.0088	47.3947	12.3217	11.41	-0.9117	11.41
14/02/2014	4000	-0.0093	48.4987	11.3169	11.28	-0.0369	11.28
15/02/2014	4000	-0.0077	42.8204	11.9517	10.59	-1.3617	10.59
16/02/2014	4000	-0.0070	40.1165	12.2851	12.13	-0.1551	12.13
17/02/2014	4000	-0.0080	44.3937	12.2151	12.96	0.7449	12.96
18/02/2014	4000	-0.0116	57.7215	11.3565	12.68	1.3235	12.68
19/02/2014	4000	-0.0085	46.3080	12.3631	11.6	-0.7631	11.6
20/02/2014	4000	-0.0075	42.3615	12.1744	12.02	-0.1544	12.02
21/02/2014	4000	-0.0058	32.6779	9.4222	9.45	0.0278	9.45
22/02/2014	4000	-0.0073	38.7404	9.7094	10.54	0.8306	10.54

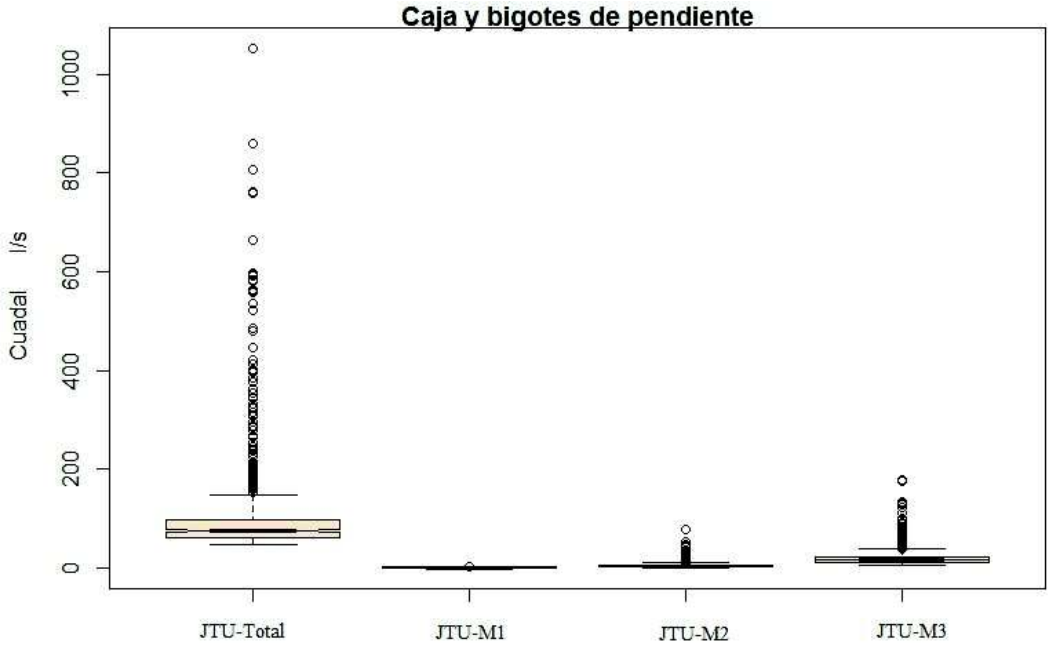
23/02/2014	4000	-0.0045	27.9532	9.8445	11.21	1.3655	11.21
24/02/2014	4000	-0.0070	35.9221	7.8638	9.94	2.0762	9.94
25/02/2014	4000	-0.0059	33.1240	9.5528	10.26	0.7072	10.26
26/02/2014	4000	-0.0088	45.7151	10.6981	11.99	1.2919	11.99
27/02/2014	4000	-0.0066	35.4439	9.1466	9.22	0.0734	9.22
28/02/2014	4000	-0.0073	39.3087	10.2269	10.2	-0.0269	10.2
01/03/2014	4000	-0.0129	60.3878	8.6725	8.56	-0.1125	8.56
02/03/2014	4000	-0.0111	54.5119	10.0613	10.99	0.9287	10.99
03/03/2014	4000	-0.0116	54.5527	7.9577	7.972	0.0143	7.972
04/03/2014	4000	-0.0076	40.9566	10.4826	11.58	1.0974	11.58
05/03/2014	4000	-0.0060	32.4363	8.4863	8.49	0.0037	8.49
06/03/2014	4000	-0.0072	37.9275	9.0303	10.19	1.1597	10.19
07/03/2014	4000	-0.0086	45.7203	11.5184	11.44	-0.0784	11.44
08/03/2014	4000	-0.0121	57.6883	9.3941	12.03	2.6359	12.03
09/03/2014	4000	-0.0098	46.4994	7.2850	7.486	0.2010	7.486
10/03/2014	4000	-0.0110	54.3164	10.2672	9.85	-0.4172	9.85
11/03/2014	4000	-0.0062	36.3435	11.6411	11.05	-0.5911	11.05
12/03/2014	4000	-0.0078	42.0198	10.6230	10.01	-0.6130	10.01
13/03/2014	4000	-0.0073	39.0828	9.9871	10.05	0.0629	10.05
14/03/2014	4000	-0.0078	42.1429	10.8666	11.3	0.4334	11.3
15/03/2014	4000	-0.0092	47.8838	11.1420	10.73	-0.4120	10.73
16/03/2014	4000	-0.0103	51.2238	9.9016	11.4	1.4984	11.4
17/03/2014	4000	-0.0057	31.8720	8.8982	9.41	0.5118	9.41

……

ELABORACIÓN: Autor

ANEXO N° 4

Distribución del conjunto datos observado en Diagrama de cajas, presencia de datos atípicos.



ELABORACIÓN: Autor