

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES**

ARTÍCULO CIENTÍFICO

TEMA:

“ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA MICROCUENCA DEL RÍO PISQUE Y SU INCIDENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE AGUA, EN LA PROVINCIA DE IMBABURA”

AUTORA:

Jennifer Natalí Salazar García

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO:

Ing. Oscar Rosales Enríquez MSc.

COMITÉ LECTOR:

Ing. Elizabeth Velarde

Ing. Xavier Zapata

PhD. Germán Martín

AÑO: 2015

LUGAR DE LA INVESTIGACIÓN:

Microcuenca del río Pisque, ubicada en las parroquias de Mariano Acosta y San Francisco de Sigsipamba, cantón Pimampiro, Provincia de Imbabura.

HOJA DE VIDA DEL INVESTIGADOR



APELLIDOS: Salazar García

NOMBRES: Jennifer Natalí

C.I: 100326941 - 0

TELEFONO CONVENCIONAL: 062 933 - 555

TELEFONO CELULAR: 0980206254 / 0996148658

CORREO ELECTRÓNICO: jennifer.salgarcia@hotmail.com

DIRECCIÓN: Imbabura, San Antonio, Sector Hcda. Chorlaví, calle Alonso Tobar s/n,
Junto a rancho San José.

FECHA DE DEFENSA: 18 de diciembre de 2015.



Análisis multitemporal de la cobertura vegetal de la microcuenca del río Pisque y su incidencia en la producción de agua, en la provincia de Imbabura

Jennifer Salazar*¹; Oscar Rosales¹

¹Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Av. 17 de Julio 5-21 y José Córdova, Ibarra, Ecuador. Teléfono: 00593-6-2997800.

Correo-e: jennifer.salgarr@hotmail.com

(*Autoras para correspondencia)

Resumen

La microcuenca del río Pisque se encuentra en las parroquias de Mariano Acosta y San Francisco de Sigüipamba del cantón Pimampiro, provincia de Imbabura. Cubre una superficie de 110 km² distribuidos entre los 2260 y 3920 msnm (Figura 1). El objetivo fue realizar el análisis multitemporal de la cobertura vegetal para conocer los cambios de uso de suelo. Para lograrlo se identificó la incidencia de la pérdida de la cubierta vegetal en los caudales de los afluentes del río Pisque. Por falta de información hidrometeorológica del área en estudio se emplearon modelos estadísticos y matemáticos para estimar los datos históricos de precipitación, temperatura (°T), evapotranspiración y caudales, entre 1991 y 2013. Se determinó que la precipitación anual para la zona oscila entre los 900 a 1200 mm, la temperatura desciende de 16,6 °C en la parte baja de la cuenca hasta 6,6°C en la parte alta. Además se realizaron aforos en las épocas estacionales del año (seca y lluviosa) para la medición de caudales puntuales. Para obtener los índices de vegetación y categorías de uso del suelo mediante técnicas de clasificación supervisada se procesaron imágenes satelitales LANDSAT con los softwares ERDAS y ArcGIS. Estas categorías fueron validadas con una matriz de confusión y el cálculo del índice KAPPA. Además se hizo el análisis multitemporal de la vegetación y se calculó la tasa de deforestación de la cuenca. Los resultados de los modelamientos hidrológicos permitieron identificar la función hidrológica de la cuenca como productora de agua, y se obtuvieron caudales medios y máximos los afluentes del río Pisque. Además, se determinó que la cobertura natural (bosque y páramo) representa 9820 ha, lo que equivale al 93% de la cuenca, y la tasa de deforestación es de -0,82% ha/año. Los resultados indican que, por la intangibilidad del área de estudio, hay regeneración natural de la vegetación. Por lo tanto se concluye que la cuenca del río Pisque tiene un buen estado de conservación, pero se sugiere implementar programas de manejo integral y de conservación por parte del Gobierno Autónomo Descentralizado de Pimampiro para mantener o incrementar esta tendencia.

Palabras Claves: *multitemporal, afluentes, modelamiento hidrológico, índices de vegetación*

Abstract

The Pisque's watershed is located in Mariano Acosta, and San Francisco of Sigüipamba parishes, in the Pimampiro county, province of Imbabura. It covers an area of 110 km² distributed between 2260 and 3920 mosl. The objective was to make the vegetation cover multi-temporal analysis to understand changes in land use. To achieve this, the effect of cover loss in the flow of Pisque's tributaries was identified.

Due to the lack of hydrometeorological information of the study area, statistical and mathematical models were used to estimate the historical data of precipitation, temperature (T°), evapotranspiration, and flows between 1991 and 2013. It was determined that annual precipitation ranges from 900 to 1200 mm, T° goes down from 16.6 °C in the lowest part of the watershed to 6.6 °C in the highest part. Furthermore appraisals were conducted in seasonal times of the year (dry and rainy seasons) to measure specific flow rates. To obtain the vegetation indexes and land use categories by supervised classification techniques, LANDSAT satellite images were processed with ArcGIS and ERDAS software. These categories were validated with a confusion matrix and the KAPPA index. The vegetation multi-temporal analysis and the watershed's deforestation rate were also estimated. Results of hydrological modeling allowed to identify the hydrological function of the water basin as water producer, and mean and maximum flows of Pisque's tributaries were obtained. The natural cover (forest and wilderness) represents 9860 ha, which is equivalent to 93% of the watershed, and the deforestation rate is -0.82% ha/year. Results indicate that, due to the intangibility of the study area, there is a natural regeneration of vegetation. This study found out that Pisque's watershed has a good condition, but it is suggested to implement integrated management and conservation programs by the Autonomous Government of Pimampiro to maintain and increase this trend.

Keywords: *Multitemporal, flowing, hydrologic model, vegetation index*

INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas tienen gran importancia, ya que son el espacio geográfico donde interacciona el hombre con el ambiente. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2009) las cuencas son ecosistemas “verticales” complejos y diversos, que integran una variedad de ecotipos y nichos ecológicos, y todo lo que sucede dentro de los límites de una cuenca es relevante para los procesos hidrológicos así como también para sus usuarios; la disponibilidad, calidad y perdurabilidad de los recursos naturales depende del uso y manejo de los mismos; el agua, suelo, bosques, y demás recursos bióticos son insumos esenciales para la vida de las comunidades rurales que obtienen alimentos, bienes y servicios a partir de estos. (SEMARNAT, 2006).

Las cuencas hidrográficas captan más de los 110.000 km³ de lluvia que se precipita anualmente en todo el mundo, por su forma cóncava permite el almacenamiento de la mayor cantidad de las reservas de agua dulce renovables en el área de confluencia de la cuenca, así como también en la superficie a través de la humedad del suelo. Sin embargo, el recoger las aguas no es la única función que cumplen las cuencas, también se les atribuye a estas la regulación de los caudales de agua, evitando de esta manera las inundaciones y las sequías en las partes más cercanas a los drenajes. (FAO, 2009).

Actualmente, el hombre en su intento por mejorar sus condiciones de existencia, provoca a menudo degradaciones o trastornos irreversibles en el entorno en que vive. El hombre, en el transcurso de los milenios ha modificado el ambiente físico y biológico en el que vive; la explotación de los recursos naturales se efectúa de un modo insostenible y a pasos agigantados; con la deforestación no sólo se destruyen hábitats, sino que también provoca la erosión del suelos y sus efectos: alteración en los procesos hidrológicos.

Según el Plan Estratégico y de Desarrollo de Imbabura (2012) en la provincia de Imbabura en general, el avance de la frontera agrícola está comprometiendo seriamente los pocos remanentes de bosques nativos y páramos que existen en los Andes especialmente en las partes altas de las microcuencas, deteriorando así los factores

ambientales agua, suelo, vegetación, flora, y fauna. Para Foley et al. (2005), el cambio de uso del suelo habitualmente suele considerarse como un problema local, sin embargo, la magnitud y ocurrencia en todo el mundo lo han convertido en un problema global, a pesar de que las prácticas del uso del suelo varían en las diferentes regiones del mundo, su objetivo generalmente es el mismo: adquirir recursos naturales para satisfacer las necesidades inmediatas de la población, aunque con ello se degrade el ambiente.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar el análisis multitemporal de la cobertura vegetal de la microcuenca del río Pisque y la incidencia sobre los caudales de los afluentes del río Pisque, situada en los cantones Pimampiro e Ibarra de la provincia de Imbabura.

Objetivos específicos

- Elaborar la línea base sobre la situación hidrológica actual de la microcuenca del río Pisque.
- Identificar los tipos de cobertura vegetal para los años 1991, 1999 y 2013 determinando los cambios de la vegetación por intervenciones antrópicas, mediante el uso de imágenes satelitales LANDSAT y ASTER.
- Realizar el modelo hidrológico de la microcuenca del río Pisque en base a la variación multitemporal de las superficies de cobertura vegetal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

Debido al rango altitudinal en ella se pueden encontrar remanente de Bosque húmedo montano bajo mientras que en la parte alta de la microcuenca (superior a los 3000 msnm) podemos encontrar grandes extensiones páramo y humedales. El río Pisque nace de la laguna de Puruhanta, una de las mayores reservas de agua dulce del país. Es un río típico de Montaña, con alto grado de disección de sus valles, el tamaño de las rocas que arrastra tienen un diámetro que supera los diez centímetros y son acarreadas sobre todo en épocas lluviosas donde el río crece considerablemente.

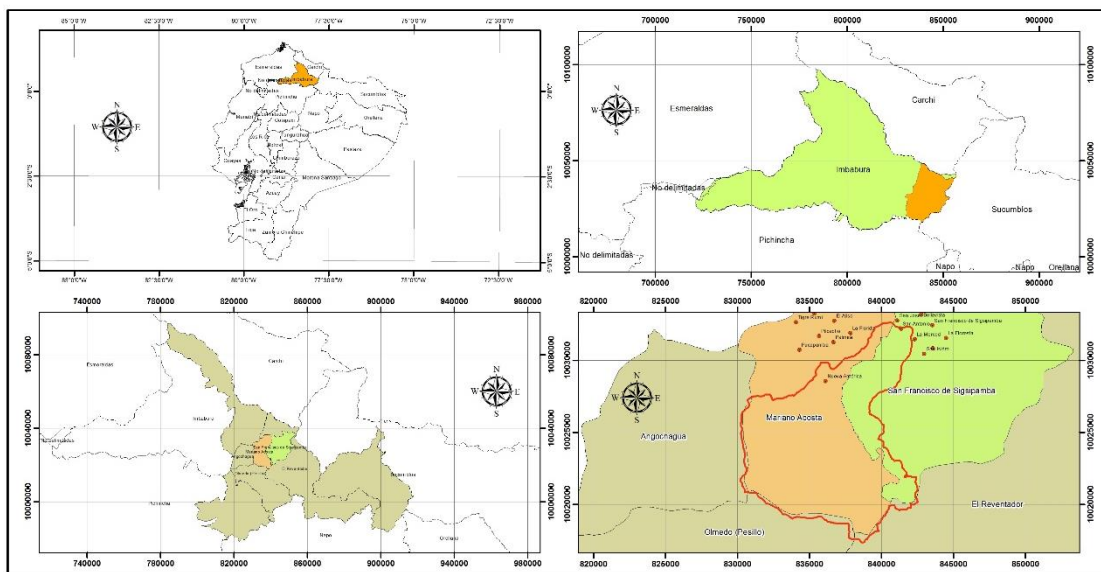


Figura 1. Ubicación de la microcuenca del río Pisque

Caracterización biofísica de la microcuenca

Se realizó la caracterización (física) de la microcuenca del río Pisque, para ello se empleó la información meteorológica e hidrológica disponible en el Geportal del Instituto Geográfico Militar (IGM).

Las estaciones del INAMHI que se utilizaron para modelar el clima fueron M0021, M0085 y M0105, M0310, M0315, M0316, M0324, M023 y M053, las mismas que por su cercanía tienen influencia dentro del área de estudio. La precipitación media fue obtenida empleando los métodos: de las Isoyetas (con los procesos estadísticos Spline y Kriging), polígonos de Thiessen y Polígonos de Thiessen modificado.

Para obtener la temperatura media, se empleó el DEM (Modelo digital de elevación); mediante la correlación de los datos históricos de temperatura se generaron ecuaciones de gradiente adiabático adaptado al área de estudio y al período de referencia en estudio, una vez obtenidas las ecuaciones con la calculadora raster se realizaron las operaciones matemáticas para obtener los raster de temperatura.

Debido a la falta de valores de caudales en el área de estudio, se emplearon las estaciones hidrometeorológicas del INAMHI H011, H012, H013, H014, H015, H016, H017, H023 y H045, y se ejecutó el procedimiento de regionalización hidrológica homogénea por el método de trazos

multidimensionales propuesto por Andrews (1972) que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$f(t) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + X_2 \sin(t) + X_3 \cos(t) + X_4 \sin(2t) + X_5 \cos(2t)$$

Dónde: X_1, X_2, \dots son las características fisiográficas y/o meteorológicas obtenidas del análisis de regresión donde la función se evalúa en el rango $-\pi \leq t \leq \pi$.

La técnica es ideal para la formación de grupos homogéneos, debido a la comparación visual con la representación gráfica de la función, las cuencas con comportamientos similares aparecen como una banda de curvas muy próximas unas de otras, pero el éxito del método depende del tipo y del ordenamiento de las variables analizadas, así X_1 representará a aquella donde el análisis de regresión resultó más significativo desde el punto de vista estadístico, X_2 a la segunda, y así sucesivamente.

Además se calcularon los parámetros morfométricos de la microcuenca del río Pisque para conocer el estado actual de la microcuenca y determinar el comportamiento hidrológico de la misma.

Para la caracterización biótica (Flora) se analizaron las Formaciones Vegetales presentes en el área de estudio de acuerdo a la clasificación de Sierra, (1999).

Adquisición y procesamiento de imágenes satelitales.

Las imágenes ASTER y LANDSAT multiespectrales disponibles en los Geoportales de la NASA y el USGS. Se eligieron las imágenes satelitales de los años 1991, 1999 y 2013. Se realizó un realce radiométrico, realce geométrico y realce multiespectral. Los archivos de salida tendrán la extensión *.img con proyección UTM, DATUM WGS84 y Elipsoide WGS84. Para la presencia de nubosidad se realizó una corrección atmosférica con el módulo ATCOR de ERDAS.

Obtención de índices de vegetación

En las imágenes ASTER y LANDSAT se aplicó la clasificación supervisada con el método estadístico "maximun likelihood" para obtener índices de vegetación (NDVI) multitemporales, empleando las bandas 1, 2, 3 y 4 que corresponden al espectro visible e infrarrojo.

Verificación y Validación de la cobertura

Durante las salidas de campo se comprobaron las categorías de cobertura vegetal existentes en el área de estudio, mediante la georeferenciación de puntos de control con GPS, para validar las categorías de cobertura vegetal obtenidas se elaboraron matrices de confusión (Tabla 1) para calcular el índice KAPA, el mismo que fue superior a 0,7, por lo que se aceptó la cobertura obtenida.

Tabla 1. Construcción de la matriz de confusión

		PREDICCIÓN	
		X ₁	X ₂
REAL	X ₁	TP	FN
	X ₂	FP	TN

Fuente: Kohavi and Provost (1998)

Dónde:

TP = Píxeles que pertenecen a la clase y que el clasificador los definió en esa clase.

FN = Píxeles que pertenecen a la clase y que el clasificador no los definió en esa clase.

FP = Píxeles que no pertenecen a la clase pero el clasificador los definió en esa clase.

TN = Píxeles que no pertenecen a la clase y que el clasificador no los definió en esa clase.

Análisis multitemporal y obtención de la tasa de deforestación

El análisis multitemporal se obtuvo comparando 2 imágenes con fecha de toma diferente, aplicando el

módulo DELTA CUE de ERDAS. Los RASTER obtenidos como resultado de los análisis fueron transformados a formatos vectoriales para su análisis en ArcGIS. Para conocer la tasa de deforestación de la microcuenca se aplicó la fórmula propuesta por Dirzo & García (1992), que se expresa por la ecuación:

$$r = 1 - \left(1 - \frac{a_1 - a_2}{a_1}\right)^{1/t}$$

Dónde: **r**: Tasa de Deforestación, **a₁**: Área de Bosque anterior (km²), **a₂**: Área de Bosque actual (km²) y **t**: Cantidad de años transcurridos.

Elaboración de modelos hidrológicos

Se realizó el modelamiento de la producción de sedimentos mediante la extensión ArcSWAT de ArcGIS, para ello se emplearon las capas raster de cobertura vegetal, tipo de suelo y pendientes del terreno, y se editó la base de datos con las estaciones M023 y M053 del INAMHI.

Se realizó el modelamiento hidrológicos de la recarga hídrica de la cuenca, empleando capas raster de precipitación y evapotranspiración real (ETR); para el cálculo de la ETR se emplearon las ecuaciones propuestas por: Holdridge (1982), Turc (1961) y Thornthwaite (1948).

$$ETP_{HOLDRIDGE} = 58,93 \cdot T^{bio}$$

Dónde: **ETP**: Evapotranspiración Potencial y **T^{bio}**: Temperatura efectiva en el crecimiento de las plantas, valores comprendidos entre 0 y 30 °C. En la zona tropical es igual a la temperatura media

$$ETP_{TURC} = \frac{P}{\sqrt[2]{0.90 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Dónde: **ETP**: Evapotranspiración potencial anual en mm/año, **P**: Precipitación en mm/año, **T**: temperatura media anual en °C y **L**: se obtiene de la ecuación:

$$L = 300 + 25T + 0.05 T^3$$

Thornthwaite, para el cálculo de la ETR emplea la siguiente ecuación:

$$e = 16 \left[10 \left(\frac{tm}{T}\right)\right]^a$$

Dónde: **e**: Evapotranspiración mensual sin ajustar en mm/mes, **tm**: Temperatura media mensual en °C, **I**: Índice de calor anual (sumatoria del índice de calor mensual) y **a**: Parámetro que se calcula en función de I, según la expresión:

$$a = 0,000000675.I^3 - 0,0000771.I^2 + 0,01792.I + 0,49239$$

Para encontrar el valor de ETP de un mes determinado fue necesario corregir la ETP sin ajustar el valor de e, a través de un coeficiente que considere el número de días que tiene el mes y la cantidad de horas luz del área de estudio. Para ello se empleó la siguiente ecuación:

$$ETP_{THO} = e \cdot L$$

Dónde: **L**: es el factor de corrección del número de días del mes (Nd_i) y las horas de sol (N_i).

$$L_i = \frac{Nd_i}{30} \cdot \frac{N_i}{12}$$

Posteriormente se realizaron los mapas de recarga hídrica de la microcuenca para los períodos 1991 y 2013, mediante la sobreposición de las capas shapefile de: suelos, geología, cobertura vegetal, bioclimas, precipitación y pendientes.

Finalmente se realizó el modelamiento del caudal superficial máximo de crecida de río Pisque, para ello se emplearon las estación del INAMHI M023 y la estación de la Universidad Técnica del Norte

Integración de los Datos Obtenidos en SIG

Los resultados obtenidos del estudio fueron representados en layouts de ArcGIS en formato A3 a escala 1:85.000.

RESULTADOS

Caracterización Biofísica

Los parámetros morfométricos obtenidos se resumen en la tabla 2; por el área se trata de una cuenca pequeña, por el valor calculado del índice de compacidad (IC), que está comprendido entre 1,50 y 1,75, se trata de una cuenca de tipo Oval Oblonga a Rectangular Oblonga, según el valor del factor forma (Ff), la susceptibilidad a crecidas es moderada. El orden (N) de la microcuenca del río Pisque es 4, que corresponde a un drenaje moderado. Se obtuvo un valor de densidad de drenaje de 1,44 km/km², considerando que

alrededor de 0,5 km/km² se refiere a cuencas mal drenadas y alrededor de 3,5 km/km² a cuencas con buen drenaje, se deduce que el valor relativamente bajo obtenido indica que se trata de una cuenca de alta montaña, es decir con poca estructuración en la red fluvial, con una condición media de drenaje. Según el valor de la pendiente media del cauce se concluye que corresponde a una microcuenca con un relieve accidentado medio, al tener un relieve poco acentuado y un coeficiente de Fournier (1960) de 1,66, se tiene que la erosión potencial que pueden producir las precipitaciones registradas para la zona se encuentra dada por un valor de aporte de sedimentos de 5,19 Tm/ha/año, es decir, no sería de mayor relevancia y se trataría de una denudación o erosión geológica normal, además este parámetro indica que la microcuenca no se encuentra degradada.

Tabla 2. Parámetros Morfométricos

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS	SIMBOLOGÍA	UNIDAD	VALORES
Área	A	km ²	109,17
Perímetro	P	km	55,76
Longitud Axial	La	km	15,38
Ancho Promedio	Ap	km	7,10
Factor Forma	Ff	-	0,46
Índice de Compacidad	IC	-	1,51
Altitud Mínima	H min	msnm	2260
Altitud Máxima	H max	msnm	3920
Desnivel Altitudinal	ΔH	msnm	1660
Altitud Media	Hm	msnm	3498,08
Pendiente Media	Sm	%	43,20
Pendiente Media del Cauce	Ir	%	8,789
Longitud de los Ríos	Lc	km	157,29
Longitud del Río Principal	L	km	18,89
Densidad de Drenaje	Dd	km/km ²	1,44
Densidad de Corrientes	Dc	-	1,39
Orden de la Cuenca	N	-	4
Coefficiente de Fournier	F	-	1,66
Tiempo de Concentración	Tc	H	1,85

Elaboración: La Autora

Fuente: Hidrología Básica y Aplicada (2007)

Los valores estimados de precipitación media fueron obtenidos del promedio aritmético de los métodos empleados para el cálculo de la precipitación media. (Tabla 3)

Tabla 3. Resumen de precipitación media estimada

MÉTODO	1991	1999	2013
Isoyetas Spline	1096,8	1041,1	1117,2
Isoyetas Kriging	863,2	852,4	875,0
Polígonos de Thiessen	938,6	933,9	959,5
Polígonos de Thiessen Modificado	947,1	941,3	883,3
PRECIPITACION MEDIA	961,4	942,2	958,8

Elaboración: La Autora

Los valores estimados de temperatura media para cada uno de los periodos de referencia fueron obtenidos con las ecuaciones obtenidas de la correlación que fueron las siguientes:

$$T_{1991} \text{ } ^\circ\text{C} = 29.549 - 0,0059 (H)$$

$$T_{1999} \text{ } ^\circ\text{C} = 33.951 - 0,0071 (H)$$

$$T_{2015} \text{ } ^\circ\text{C} = 27.098 - 0,0049 (H)$$

Dónde: T: es la Temperatura en $^\circ\text{C}$, H: es la altitud expresada en msnm.

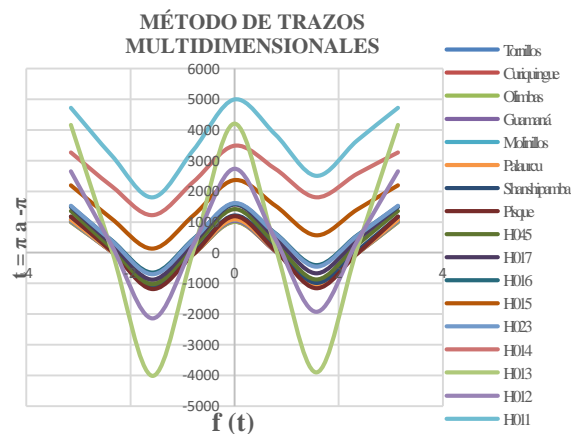
Tabla 4. Valores Estimados de Temperatura ($^\circ\text{C}$)

MES	TEMPERATURA MEDIA		
	1991	1999	2013
ENE	8,8	9,2	9,8
FEB	9,1	9,0	9,7
MAR	8,9	8,9	9,8
ABR	8,9	9,1	10,1
MAY	9,3	9,6	10,6
JUN	8,8	9,5	10,1
JUL	8,3	8,5	10,1
AGO	8,5	8,3	9,6
SEP	8,5	9,2	9,9
OCT	9,1	9,6	10,6
NOV	9,1	9,5	10,5
DIC	9,3	9,6	10,3
ANUAL	8,9	9,2	10,1

Elaboración: La Autora

Fuente: INAMHI (1965 – 2013)

En la tabla 4, se encuentran los valores de temperatura estimados para cada mes. Se evidenció que a pesar de que en el periodo 1991 existió un evento ENOS conocido como “la niña” que provoca temperaturas bajas y sequías, y en el periodo 1999 Ecuador pasó por uno de los eventos ENOS más fuertes de la historia del país, denominado “el niño” que es el causante de temperaturas altas y precipitaciones excesivas, la precipitación media se mantiene casi estable en todos los periodos.



Elaboración: La Autora

Fuente: INAMHI (1963 – 2013)

Como se observa en el gráfico, la microcuenca del río Pisque y todos sus drenajes menores se encuentran dentro de la misma región hidrológica que las estaciones: H015, H016, H017, H023 y H045; es decir que únicamente se puede transferir información hidrométrica a los drenajes menores en estudio de las cinco estaciones citadas. Las otras cuencas quedan descartadas por cuanto pertenecen a otra región hidrológica.

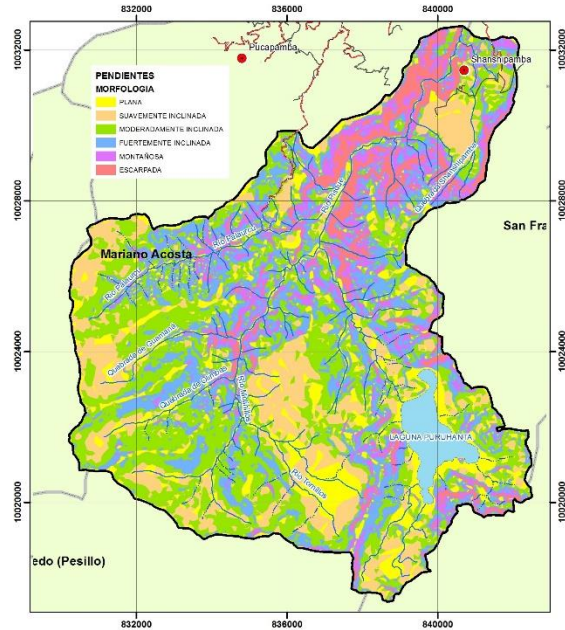


Figura 2. Pendientes de la microcuenca del río Pisque

Elaboración: La Autora

Las altitudes oscilan entre 2.260 y 3.920 msnm, en la parte del sector suroriental se encuentra ubicada la laguna de Puruhanta. Las pendientes mayores de estas zonas se encuentran en los interfluvios escarpados de los ríos que fluyen en sentido S-N, como se indica en el gráfico 11, con pendientes que llegan hasta el 80%.

Durante el trabajo de campo se evidenciaron las siguientes formaciones vegetales: páramo herbáceo, páramo arbustivo y de almohadillas, bosque siempreverde montano alto, bosque de neblina montano alto y matorral húmedo montano, (Sierra, 1999) y el área de estudio corresponde a los pisos zoogeográficos Templado y Alto Andino (Albuja, 1980) sistemas naturales característicos de la región norte y centro de los andes ecuatorianos.

Obtención de Índices de Vegetación

Como se observa en la figura 3, las coberturas vegetales del año 1991 con mayor extensión en el área de estudio fueron: páramo herbáceo con una superficie de 52,11 km² y bosque natural con una superficie de 40,96 km² es decir un porcentaje de

47,74 % y 37,52 % respectivamente; el 14,74 % de la superficie restante de la microcuenca se distribuye en las categorías páramo arbustivo, cuerpos de agua, pantano, vegetación arbustiva, pastizales, cultivos y suelo sin vegetación.

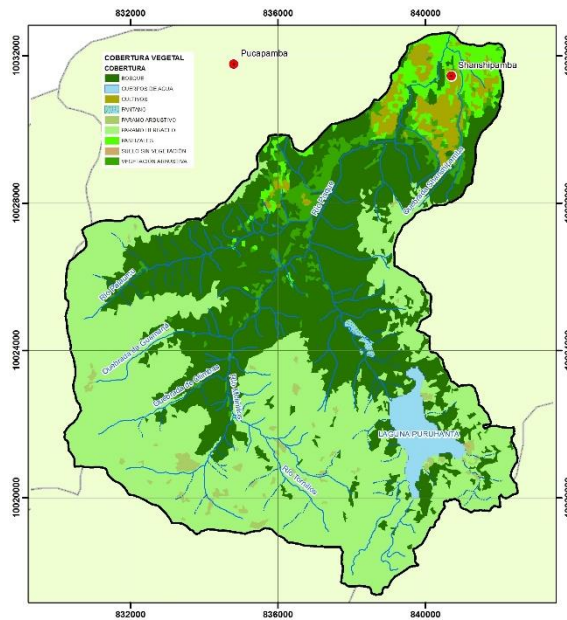


Figura 3. Cobertura Vegetal microcuenca del río Pisque (1991)
Elaboración: La Autora

En la figura 4 se representa al mapa de cobertura vegetal del año 2013, se obtuvo como resultado que las categorías con mayor superficie son páramo herbáceo con 46,13 km² y bosque con 44,31 km² y se obtuvo como resultado un porcentaje de 42,26 % y 40,59 %. El 17,15 % restante de la superficie de la cuenca se distribuye en las categorías páramo arbustivo, vegetación arbustiva, cuerpos de agua, pantano, pastizales y cultivos.

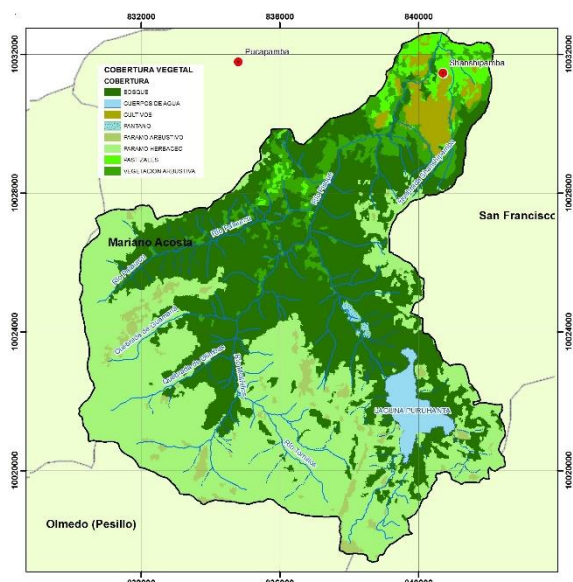


Figura 4. Cobertura Vegetal microcuenca del río Pisque (2013)
Elaboración: La Autora

Se unieron en una categoría denominada “Bosque” a las coberturas bosque y vegetación arbustiva, así como también se unieron en una sola categoría denominada “Páramo” a las coberturas páramo herbáceo y páramo arbustivo.

En la tabla 5 se evidencian los resultados obtenidos del análisis multitemporal, los valores negativos significan un incremento en la cobertura en el período comprendido entre los años 1991 y 2013, mientras que un signo positivo significa una disminución en la superficie de cobertura.

Tabla 5. Análisis Multitemporal

COBERTURA	1991 km ²	2013 km ²	DIFERENCIA km ²
Bosque	45,31	51,11	- 5,8
Cuerpos de Agua	2,61	2,39	0,22
Pantano	0,25	0,29	- 0,04
Páramo	53,62	49,19	4,43
Uso Antrópico	7,37	6,15	1,22

Elaboración: La Autora

La superficie de la categoría bosque incrementó en 5,8 km², especialmente en la parte alta de la microcuenca, alrededor de la laguna se evidenció una invasión del bosque sobre lo que antes era páramo, esto se debe a un desplazamiento de los pisos térmicos, de acuerdo al análisis climatológico, la temperatura incrementó en 1,1 °C, comparando los períodos 1991 y 2013. El espejo de agua de la laguna de Puruhanta tiene una disminución de 0,22 km², por otra parte la categoría pantano incrementó la superficie en 0.04 km², esto se debe a la fecha de captura de las imágenes, en el Ecuador existen dos épocas estacionarias bien marcadas (la época seca y la época lluviosa); el aumento de la superficie de la categoría cuerpos de agua se debe a este fenómeno, la imagen satelital Landsat utilizada para el período actual fue tomada en el mes de abril (época lluviosa), mientras que la imagen satelital Landsat utilizada para el período 1991 fue capturada el mes de agosto (época seca).

Se fusionó en una sola categoría denominada “uso antrópico” a las categorías cultivos, pastizales y suelo sin vegetación, ya que los aumentos y decrecimientos en estas categorías, si se analizan separadamente, se debe al cambio de uso de suelo de las mismas; en esta categoría de uso antrópico se registró una disminución de 1,22 km² y con ello se elimina la idea de que existe en la zona de estudio un avance en la frontera agrícola, y más bien se podría decir que por la inaccesibilidad de la zona, existió una regeneración vegetativa de ciertas áreas intervenidas.

Considerando como “área de bosque” a la sumatoria de la categoría Bosque con la categoría Páramo se obtuvo una tasa de deforestación en la

cuenca del río Pisque de -0,8444 %, el signo negativo significa ausencia de pérdidas de la cubierta vegetal, es decir que no existió un avance de la frontera agrícola, más bien se evidenció una modificación del uso de suelo y una regeneración vegetativa natural de 0,03 km² por año.

Modelamiento Hidrológico

Los resultados obtenidos en la modelación hidrológica del arrastre de sedimentos de los períodos de análisis se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6. Modelamiento hidrológico ArcSWAT

RELACIONES	MODELAMIENTO PERIODO 1991	MODELAMIENTO PERIODO 2013
Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs)	268	257
Tiempo de análisis	Mensualmente	Mensualmente
Caudal/Precipitación	0.15	0.15
Percolación/Precipitación	0.01	0.02
Promedio de la producción de sedimentos en tierras altas	7,47 (Tm/ha)	5,2 (Tm/ha)
Escurrimiento superficial	2,45 (mm/año)	2,17 (mm/año)

Elaboración: La Autora

Fuente: INAMHI (1963 – 2013)

La relación “caudal/precipitación”, para el año 1991, el software reportó que el 15% de la precipitación se transformó en escurrimiento, este comportamiento se repitió en el año 2013, esto se debe principalmente a que la precipitación y la cobertura vegetal no variaron significativamente en los períodos 1991 y 2013.

En la relación “percolación/precipitación”, para el período 1991 el porcentaje de precipitación que se infiltró hacia las capas subterráneas fue del 1%, mientras que para el período 2013 aumentó al 2%; como se ha indicado anteriormente, se evidenció un aumento en la superficie de la categoría bosque, por lo que es probable que este aumento se deba a que el bosque natural interceptó mayor cantidad de precipitación que en el año 1991, evitando así la formación inmediata de escurrimiento.

La producción máxima de sedimentos para el período 1991 fue de 7,47 (Tm/ha), mientras que para el período 2013 fue de 5,2 (Tm/ha), como se observa existió una disminución del 30,39%, debido a los factores de precipitación y cobertura vegetal que se indicó anteriormente. Los datos de producción de sedimentos indican que la cuenca se encuentra en buen estado de conservación, ya que según la tabla 5, citada en el literal c) del numeral 2.2.4.1, una cuenca con una producción de sedimentos de 0 a 10 (Tm/ha/año) es una cuenca que se califica con denudación o erosión geológica normal.

Se obtuvieron los resultados de la ETR mensual por el método Holdridge, los resultados anuales de ETR por el método de Turc, y de Thornthwaite. En la tabla 7 se muestran los valores estimados por cada uno de los métodos, y se determinó como caudal base, al promedio aritmético de los tres métodos, obteniéndose así, un caudal de 1,45 m³/s para el período 1991, 1,40 m³/s para el período 1999 y 1,40 m³/s para el período 2013.

Tabla 7. Modelamiento de la Recarga Hídrica de la cuenca

METODO	VARIABLE	AÑO		
		1991	1999	2013
HOLDRIDGE	P (mm)	961,4	942,2	958,8
	ETR (mm)	532,2	539,8	578,9
	E (mm)	429,2	402,4	379,9
	Q (m ³ /s)	1,49	1,39	1,32
TURC	P (mm)	961,4	942,2	958,8
	ETR (mm)	518,5	493,7	448,5
	E (mm)	442,9	448,5	470,2
	Q (m ³ /s)	1,53	1,55	1,63
THORNTWHAITE	P (mm)	961,4	942,2	958,8
	ETR (mm)	576,5	580,7	596,9
	E (mm)	384,9	361,5	361,9
	Q (m ³ /s)	1,33	1,25	1,25

Elaboración: La Autora

Fuente: INAMHI (1963 – 2013)

Para determinar tendencias de cambio en los ciclos hidrológicos, es imprescindible contar con un registro histórico de al menos 25 años como mínimo, sin embargo, en el presente estudio se realizó el análisis basándose en tres períodos, aunque eso limite la obtención de conclusiones sólidas. Como se puede evidenciar, comparación el año 1991 con el año 1999, existió una disminución en el escurrimiento anual de 14,87 mm, lo que representó la disminución en el caudal anual de 51,48 l/s. Por otro lado se comparó la producción de agua de la cuenca en el periodo 2013 con el periodo 1999, y se obtuvo que el escurrimiento anual del periodo actual tuvo un incremento del escurrimiento de 0,13 mm, lo que representa un caudal anual de 0,17 l/s. que son valores no muy representativos para los dos casos, y esto se debe a que la modificación del uso de suelo no ha sido considerable, y a pesar de haber existido mayor precipitación en el periodo actual que en el período 1999, también existió un aumento en la temperatura media de sin embargo existió un aumento en la temperatura media de 0,9 °C, lo que provocó un incremento en la evapotranspiración.

Como se muestra en la figura 5, en la parte alta de la cuenca con 84,51 km² de la superficie total de la cuenca del río Pisque, se obtuvo que un 55,33% de la superficie pertenece a una zona de recarga hídrica media, el 36,97% de la superficie que pertenece a una zona de recarga hídrica alta y el 7,70% de la superficie pertenece a una zona de recarga hídrica

baja. En la parte media de la cuenca, con una superficie de 18,77 km², se obtuvo que un 82,44% de la superficie pertenece a una zona de recarga hídrica alta, un 17,51% de la superficie pertenece a una zona de recarga hídrica media y un 0,05% de la superficie pertenece a una zona de recarga hídrica baja. En la parte baja de la cuenca que compromete a 5,88 km² de la superficie total de la cuenca, se obtuvo que el 66,65% de la superficie pertenece a una zona de recarga hídrica alta, mientras que el 33,35% pertenece a una zona de recarga hídrica media.

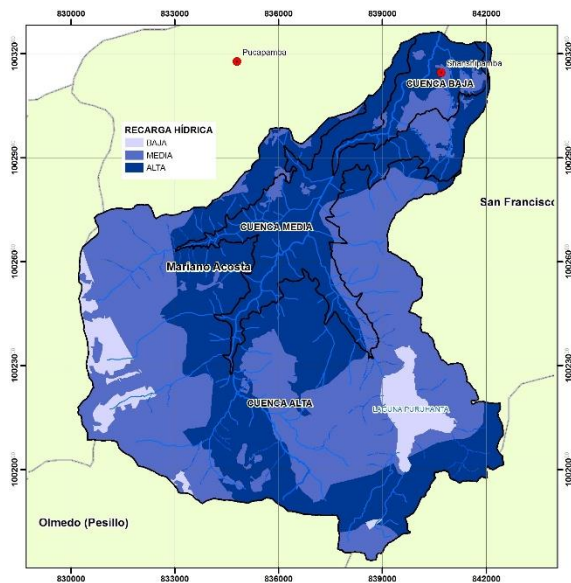


Figura 5. Mapa de Recarga hídrica (1991)

Elaboración: La Autora

Fuente: IGM, cartografía escala 1:50.000

Como se puede ver en la figura 6, en la parte alta de la cuenca con 84,51 km² de la superficie total de la cuenca, se obtuvo que un 61,62% de la superficie pertenece a una zona de recarga hídrica media, un 30,91% de la zona pertenece a una zona de recarga hídrica alta y el 7,47% pertenece a una zona de recarga hídrica baja. La parte media de la cuenca, con 18,77 km² de la superficie total de la cuenca, se obtuvo que el 82,17% de la superficie pertenece a una zona de recarga hídrica alta, el 17,71% pertenece a una zona de recarga hídrica media y el 0,12% a una zona de recarga hídrica baja. En la parte baja de la cuenca con 5,88 km² de la superficie total de la cuenca, se obtuvo que el 67,47% del área pertenece a una zona de recarga hídrica alta, mientras que el 32,53% pertenece a una zona de recarga hídrica media.

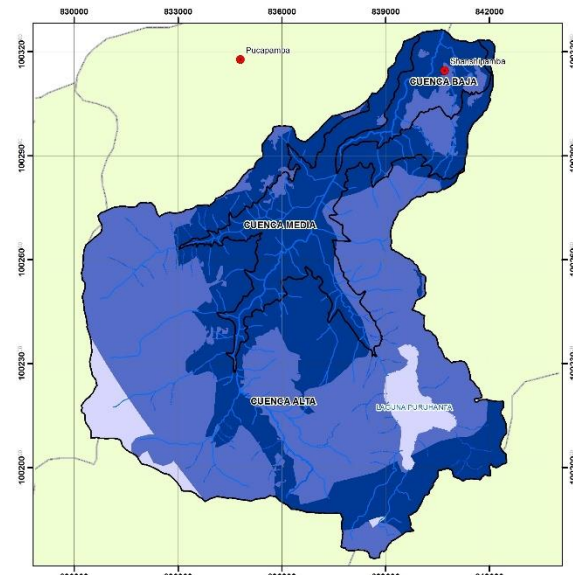


Figura 6. Mapa de Recarga hídrica (2013)

Elaboración: La Autora

Fuente: IGM, cartografía escala 1:50.000

Para ejecutar el modelamiento del caudal máximo superficial, el software HEC-HMS requirió los datos que adjuntan en la tabla 8.

Tabla 8. Datos HEC-HMS

DATO	SIMBOLOGÍA	VALOR
Curva Número	CN	64,31056
Tiempo de Concentración	T _c	1,8506 h 111,036 min
Tiempo transcurrido desde el centro de gravedad (60% del T _c)	Lag Time	66,6216
Abstracción inicial	P ₀	28,19169

Elaboración: La Autora

Fuente: INAMHI (1963 – 2013)

Con los datos de la estación Ibarra – UTN el pico más alto de la crecida fue de 0,7 m³/s y se registró el 27 de febrero de 2012 a las 22h00. En la parte superior del gráfico 20, se registra con color rojo la cantidad agua que colecta la microcuenca, mientras que el color azul indica la cantidad de precipitación efectiva. En la parte inferior del gráfico la línea de color azul corresponde al hidrograma de comportamiento que tiene el caudal en donde se visualiza también el pico más alto de la crecida; la línea de color rojo en la base del eje X, indica el caudal base considerado para el modelamiento hidrológico, que en este caso tuvo un valor de “0”.

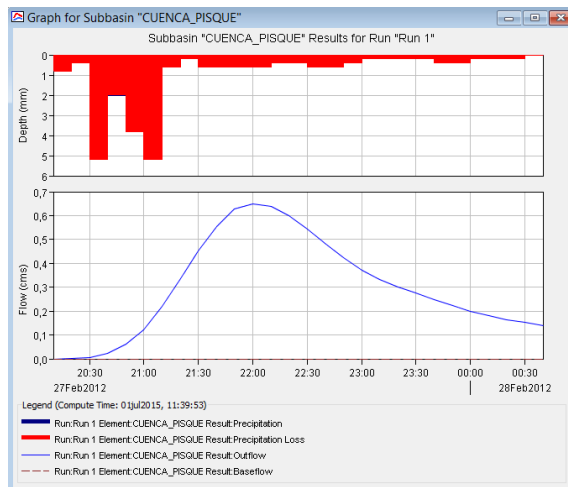


Figura 7. Resumen gráfico del modelamiento de la cuenca del río Pisque en intervalos de tiempo de 10 min, con datos registrados en intervalos de tiempo de 10 min.

Es importante mencionar que el caudal modelado en los dos casos corresponde a caudal superficial, es decir que debe ser sumado al caudal base para determinar el volumen exacto del caudal máximo en un día de tormenta.

CONCLUSIONES

- La cuenca del río Pisque posee procesos erosivos geológicos normales que son típicos de cuencas de alta montaña. A pesar de las actividades antropogénicas que se desarrollan en la cuenca, posee una gran extensión de bosque primario y los páramos se encuentran poco intervenidos debido al difícil acceso; además mantiene las características climáticas y biogeográficas de formaciones naturales propias de los andes del norte por lo que se puede concluir es una cuenca que se encuentra en buen estado de conservación.
- Según los estudios climatológicos realizados en los tres períodos de estudio, se concluye que debido a la diferencia no significativa en los valores de precipitación media estimados para cada uno de los años en estudio, el área de la cuenca no es afectada mayormente por eventos ENOS, más bien es una cuenca que está influenciada por los procesos atmosféricos desarrollados en la cordillera oriental, que es la que influye en las precipitaciones incrementando o disminuyendo los caudales de los afluentes del río Pisque.
- La cobertura vegetal de la microcuenca del río Pisque está estructurada mayormente por bosque, vegetación arbustiva, páramo herbáceo, páramo arbustivo y cuerpos de agua, y escasas extensiones de pastizales y cultivos. Actualmente la microcuenca está cubierta en un 91,87 % por formaciones vegetales naturales, un

5,63 % por formaciones vegetales de tipo antropogénico y un 2,50 % por cuerpos de agua.

- En el análisis multitemporal se detectó un valor negativo de deforestación de 0,8234 %, en un intervalo de tiempo de 22 años, es decir que no existieron pérdidas de la vegetación natural por actividades antrópicas.
- Debido al problema mundial del calentamiento global, en los 22 años ha existido un desplazamiento de los pisos térmicos, y esto ha generado un incremento de la superficie del bosque en la parte alta de la microcuenca y causando a su vez una disminución en la superficie de páramo. Se estimó que la temperatura media del aire en 1991 fue de 8.9 °C, mientras que para el año 2013 la temperatura media del aire fue 10.0, tomando como referencia los dos períodos, en 22 años existió un incremento en la temperatura media del aire de 1.1 °C.
- Los modelamientos hidrológicos realizados en el presente trabajo es la mejor predicción para los procesos hidrológicos y atmosféricos ocurridos en la cuenca; sin embargo debido a la falta de datos de la zona, los datos estimados deben ser validados con datos reales de al menos 30 años de registros.
- Después de realizar el modelamiento hidrológico de la microcuenca del río Pisque, se determinó que es una cuenca productora de agua, por lo que se concluye que se deben implementar políticas de gestión, manejo y protección de las fuentes de agua. A pesar de no tener pérdidas en las superficies de vegetación natural, el Gobierno Autónomo Descentralizado de Pimampiro debería implementar un programa para el manejo integral de la cuenca.
- En la microcuenca del río Pisque no existieron cambios significativos en la cobertura vegetal en 22 años, y los resultados se reflejan en los caudales estimados de escorrentía que tampoco presentaron cambios relevantes, en 1991 se obtuvo un caudal medio de 1.45m³/s mientras que para el período actual el caudal medio estimado fue de 1,40 m³/s.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda complementar los resultados del presente trabajo con el monitoreo de los caudales de la microcuenca debido a la falta de estaciones hidrométricas y pluviométricas.
- Se recomienda realizar estudios similares en cuencas aledañas, para determinar tempranamente el impacto que generan las actividades antropogénicas en estas unidades hidrográficas e implementar programas de conservación y manejo de las mismas.

- Se recomienda a al Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Pimampiro incluir los resultados del presente trabajo en el fortalecimiento del Plan de Ordenamiento Territorial del Cantón.
- Los modelamientos hidrológicos mediante los softwares ArcSWAT y HEC-HMS deben ser aplicados a las cuencas y microcuencas pluviales, cuya potencialidad es la producción de agua debido a la existencia de bosques naturales y páramos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUJA, L. 1980. Estudio preliminar de los vertebrados ecuatorianos. Escuela Politécnica Nacional. Quito.
- BASTIDAS, C. 2005. Manual para el uso del modelo hidrológico HEC-HMS. Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica. Universidad Central de Venezuela. Venezuela.
- CÓRDOBA, S., ZEA, J. y MURILLO, W. 2006. Estimación de la precipitación media, evaluación de la red pluviométrica y cuantificación del balance hídrico en la cuenca del río Quito en el departamento del Chocó, Colombia. Bogotá, D. C. - Colombia.
- DIRZO, R. y GARCIA, M. 1992. Rates of deforestation in Los Tuxlas, a neotropical area in southeast México. Conservation Biology
- FOURNIER, F. 1960. Climat et Erosion. PUF, Paris.
- HOLDRIDGE, L. R. 1982. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). 2007. ¿Por qué invertir en la ordenación de cuencas hidrográficas?. Roma, Italia.
- POURRUT, P. 1995. El agua en el Ecuador: Clima, precipitaciones y escorrentía, en Estudios de Geografía, vol. VII, Quito.
- SEMARNAT. 2006. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. México.
- SIERRA, R. (Ed). 1999. Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental. Proyecto INEFAN/GEF/BIRD y EcoCiencia, Quito, Ecuador.
- SKOLOV, A y CHAPMAN, T. 1974. Studies and reports in hydrology, 17. Methods for water balance computations. An international guide for research and practice. Paris.
- TAPIA, M (Ed). 1997. Manejo integral de Microcuencas. Cajamarca.
- THORNTHWAITE, C. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review, Vol. 38, No. 1., (pp. 55-94.)
- TURC, L. 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. French.
- URIBE, N. 2010. Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT 2005. Colombia.
- USDA Soil Conservation Service. 2005. National Engineering Handbook. Section 4. Hydrology.

Ing. Oscar Rosales MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Srta. Jennifer Salazar García

AUTORA