



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**



**INSTITUTO DE POSTGRADO**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**“APLICACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CHOTA, AL NORTE DE ECUADOR.”**

**Trabajo de Investigación previo a la obtención del Título de Magíster en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas.**

**DIRECTOR:**

Ing. José Guzmán Paz MSc.

**AUTOR:**

Ing. Marco Patricio Vaca Ruíz

**IBARRA - ECUADOR**

**2018**

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del Trabajo de Grado, presentado por el Ing. Marco Patricio Vaca Ruiz, para optar por el grado de Magíster en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, doy fe de que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 24 días del mes de septiembre del 2018



Ing. José Guzmán Paz MSc.

TUTOR

## APROBACIÓN DEL JURADO

“APLICACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CHOTA, AL NORTE DE ECUADOR.”

Por: Marco Patricio Vaca Ruiz

Trabajo de Grado de Maestría aprobado en nombre de la Universidad Técnica del Norte, por el siguiente jurado, a los 24 días del mes de septiembre del 2018.

	Apellidos y Nombres	Firma
Tutor	Ing. Paz José Guzmán Msc.	
Asesor	Ing. Ramírez López Jorge Msc.	

## AUTORÍA

Yo; Marco Patricio Vaca Ruiz, portadora de la cedula de ciudadanía N° 1002650479, declaro que la presente investigación denominada: **“APLICACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CHOTA, AL NORTE DE ECUADOR.”**, es de mi autoría y responsabilidad, y se han respetado las diferentes fuentes de información realizando las citas correspondientes.



Ing. Marco Patricio Vaca Ruiz  
CI: 1002650479

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**INSTITUTO DE POSTGRADO**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**  
**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD**  
**TÉCNICA DEL NORTE**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
CÉDULA DE IDENTIDAD		1002650479	
APELLIDOS Y NOMBRES		Marco Patricio Vaca Ruiz	
DIRECCIÓN		Calle Puruhanta y Panamericana norte	
E-MAIL		<a href="mailto:pvaca78@gmail.com">pvaca78@gmail.com</a>	
TELÉFONO FIJO	022-823-344	TELÉFONO MÓVIL	0979214518
<b>DATOS DE LA OBRA</b>			
<b>TÍTULO:</b>	“APLICACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CHOTA, AL NORTE DE ECUADOR.”		
<b>AUTOR:</b>	Marco Patricio Vaca Ruiz		
<b>FECHA:</b>	24/09/2018		
<b>SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO</b>			
<b>PROGRAMA:</b>	POSGRADO		

<b>TITULO POR EL QUE SE OPTA:</b>	Magíster en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas
<b>DIRECTOR:</b>	Ing. José Guzmán Paz MSc

## 2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Marco Patricio Vaca Ruíz, con cédula de ciudadanía Nro. 1002650479, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

## 3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 24 días del mes de septiembre de 2018

El Autor



Ing. Marco Patricio Vaca Ruiz  
CI: 1002650479

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO**  
**A FAVOR DE LA**  
**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Yo, Marco Patricio Vaca Ruiz con cédula de ciudadanía Nro. 1002650479 manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor del trabajo de grado denominada: “APLICACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CHOTA, AL NORTE DE ECUADOR” que ha sido desarrollada para optar por el título de Magíster en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

## **DEDICATORIA**

A Dios por proveerme la sabiduría y voluntad para culminar la carrera de posgrado, que constituye una meta muy importante en mi vida.

A mis padres Lizandro y Natividad por acompañarme cada momento, siendo mis consejeros en la parte espiritual, fortaleciéndome en cada obstáculo y dificultad.

A mis hermanos y mis sobrinos por su confianza depositada en mí, por su amor incondicional y su compañía en los momentos difíciles.

A mis hijos Sarahí y Adair, quienes son mi inspiración y la fuerza que me impulsa a cumplir mis metas, que con cada sonrisa y abrazo me llenan el alma y le dan sentido a mi vida.

## **RECONOCIMIENTO**

Mi sincero agradecimiento al Ing. José Guzmán Paz MSc, quien compartió su tiempo y conocimiento en el desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación.

Mi reconocimiento al sr Ing. Jorge Ramírez MSc, por sus contribuciones y recomendaciones para el enriquecimiento del presente documento.

Mi gratitud a mis compañeros de curso por brindarme su amistad y compartir sus vivencias y conocimientos en el transcurso del periodo académico.

## **MENCIÓN ESPECIAL**

En memoria de Juan Alcívar, amigo que nos dejó en el camino de esta maestría, quien dejó gratos recuerdos en el tiempo en el que fuimos compañeros.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>APROBACIÓN DEL TUTOR</b> .....	<b>ii</b>
<b>APROBACIÓN DEL JURADO</b> .....	<b>iii</b>
<b>AUTORÍA</b> .....	<b>iv</b>
<b>AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE</b> .....	<b>v</b>
<b>CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO</b> .....	<b>vii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>viii</b>
<b>RECONOCIMIENTO</b> .....	<b>ix</b>
<b>MENCIÓN ESPECIAL</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>x</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvi</b>
<b>CAPITULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Problema de investigación</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos de la investigación</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2.1. Objetivo general</b> .....	<b>3</b>
1.2.1.1. Objetivos específicos.....	<b>3</b>
<b>1.3. Justificación de la investigación</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4. Hipótesis</b> .....	<b>4</b>
<b>CAPITULO II</b> .....	<b>5</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1. Conservación de suelos y agua</b> .....	<b>5</b>

2.1.1.	Normativa internacional .....	8
2.1.2.	Normativa nacional .....	8
2.2.	Escurrecimientos superficiales .....	9
2.2.1.	Escurrecimiento medio .....	10
2.2.2.	Escurrecimiento máximo instantáneo.....	11
2.2.2.1.	Método racional modificado para estimar escurrecimientos máximos.....	12
2.2.2.2.	Método de las curvas numéricas o del SCS (USA).....	13
2.2.2.2.1.	Escorrentía.....	13
2.2.2.2.2.	Tipo de suelo .....	14
2.2.2.2.3.	Condiciones hidrológicas de la cuenca.....	14
2.2.2.2.4.	Usos del suelo.....	14
2.2.2.2.5.	Humedad antecedente.....	16
2.3.	Análisis multicriterio .....	17
2.3.1.	Componente de un árbol de criterios.....	19
2.3.1.1.	Limitantes.....	19
2.3.1.2.	Factores .....	19
2.3.2.	Valorización parcial .....	20
2.3.3.	Análisis de jerarquía.....	21
2.3.4.	Comparación Pareada.....	21
<b>CAPITULO III.....</b>		<b>24</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>		<b>24</b>
3.1.	Tipo de investigación.....	24
3.2.	Ubicación .....	24
3.3.	Métodos.....	25
3.3.1.	Teórico .....	25

3.3.2.	Empírico .....	26
3.4.	Flujo de Trabajo .....	26
3.5.	Preparación de los datos de entrada y pre-procesamiento .....	27
3.5.1.	Precipitación .....	28
3.5.2.	Escorrentía .....	29
3.5.3.	Pendiente .....	31
3.5.4.	Tipo de suelo .....	32
3.5.5.	Uso y cobertura de la tierra. ....	32
3.6.	Mapas de criterios.....	32
3.7.	Aplicación del Método de Análisis Multicriterio (MAM) en la investigación	33
3.7.1.	Modelización del problema .....	33
3.7.2.	Evaluación y priorización de alternativas y criterios .....	34
3.7.3.	Síntesis del problema.....	36
3.7.4.	Escala de evaluación.....	36
3.8.	Generación de mapas de idoneidad .....	37
<b>CAPITULO IV .....</b>		<b>39</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>		<b>39</b>
<b>4.1.</b>	<b>Preparación de los datos de entrada y pre-procesamiento .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1.1.</b>	<b>Precipitación .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1.2.</b>	<b>Escorrentía .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.3.</b>	<b>Pendiente .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.4.</b>	<b>Uso del suelo.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.5.</b>	<b>Suelos .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.5.1.</b>	<b>Orden de los suelos de la cuenca .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.5.2.</b>	<b>Profundidad de los suelos de la cuenca .....</b>	<b>46</b>

4.1.5.3. Textura de los suelos de la cuenca .....	47
4.3. Mapas de criterios.....	49
4.4. Análisis Multicriterio.....	52
<b>CAPITULO V.....</b>	<b>55</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>55</b>
5.1. CONCLUSIONES .....	55
5.2. RECOMENDACIONES.....	57
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>65</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 .....	6
Tabla 2 .....	7
Tabla 3 .....	11
Tabla 4 .....	15
Tabla 5 .....	16
Tabla 6 .....	17
Tabla 7 .....	20
Tabla 8 .....	20
Tabla 9 .....	22
Tabla 10 .....	22
Tabla 11 .....	23
Tabla 12 .....	35
Tabla 13 .....	37
Tabla 14 .....	39
Tabla 15 .....	50
Tabla 16 .....	52
Tabla 17 .....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	25
Figura 2. Flujo de trabajo.....	27
Figura 3. Modelo jerárquico de objetivos, criterios y alternativas para la investigación planteada .....	34
Figura 4. Relación altitud precipitación, de la media estacional y la máxima diaria a un periodo de retorno de un año con un 10% de probabilidad.....	40
Figura 5. Escorrentía de la cuenca del río Chota .....	41
Figura 6. Coeficiente de escorrentía de la cuenca del río Chota.....	42
Figura 7. Pendiente del terreno de la cuenca del río Chota .....	43
Figura 8. Uso y Cobertura del suelo de la cuenca del río Chota.....	44
Figura 9. Taxonomía de los suelos de la cuenca del río Chota.....	46
Figura 10. Profundidad de los suelos en la cuenca del río Chota .....	47
Figura 11. Textura de los suelos en la cuenca del río Chota.....	49
Figura 12. Niveles idóneos de factores ambientales en la cuenca del río Chota .....	51
Figura 13. Mapas de idoneidad para aplicar TCSA (zanjas de infiltración y terrazas de formación).....	53

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**INSTITUTO DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**“APLICACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CHOTA, AL NORTE DE ECUADOR”**

**Autor: Ing. Marco Patricio Vaca Ruíz**

**Tutor: Ing. José Guzmán Paz MSc**

**Año: 2018**

**RESUMEN**

El presente estudio presenta un método para identificar y clasificar los sitios potenciales para aplicar técnicas de conservación de suelos y agua en la cuenca del río Chota. La metodología tiene en cuenta los criterios ambientales de la cuenca ponderados mediante el método matemático conocido como Proceso de Análisis Jerárquico. Los datos espaciales se procesaron con ayuda de sistema de información geográfica (ArcGis 10.3) y los sitios potenciales se clasificaron a través del análisis multicriterio para lo que fue necesario ponderar los factores ambientales de meteorología, hidrología, topografía, uso y cobertura del suelo y pedología. El método se aplica para identificar sitios potenciales para aplicar terrazas de formación y zanjas de infiltración en la cuenca del río Chota, que se encuentra en los Andes del norte del Ecuador. El análisis indica que el 14.75% de la cuenca es óptimo para la implementación de terrazas de formación y el 36.72% presenta condiciones muy adecuadas; mientras que para la ejecución de zanjas de infiltración el 1.19% y el 18.58% de la superficie de la unidad hídrica presentan condiciones óptimas y muy adecuadas correspondientemente. La identificación previa de sitios potenciales para aplicar técnicas de conservación de suelo y agua es una herramienta útil en la ejecución de los programas de conservación que permiten optimizar tiempo y recursos.

**Palabras clave:**

Técnicas de Conservación de Suelo y Agua (TCSA), Métodos de Análisis Multicriterio (MAM), Proceso Analítico Jerárquico (AHP), Cuenca del Río Chota.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**INSTITUTO DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**“APLICACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CHOTA, AL NORTE DE ECUADOR”**

**Autor: Ing. Marco Patricio Vaca Ruíz**

**Tutor: Ing. José Guzmán Paz MSc**

**Año: 2018**

**ABSTRACT**

The present study presents a method to identify and classify potential sites to apply soil and water conservation techniques in the Chota river basin. The methodology takes into account the environmental criteria of the basin weighted by the mathematical method known as the Hierarchical Analysis Process. The spatial data were processed with the help of geographic information system (ArcGis 10.3) and the potential sites were classified through the multicriteria analysis for which it was necessary to weight the environmental factors of meteorology, hydrology, topography, use and coverage of the soil and pedology. The method is applied to identify potential sites to apply formation terraces and infiltration ditches in the Chota river basin, which is located in the Andes of northern Ecuador. The analysis indicates that 14.75% of the basin is optimal for the implementation of training terraces and 36.72% presents very adequate conditions; while for the execution of infiltration ditches the 1.19% and 18.58% of the surface of the water unit present optimal and correspondingly appropriate conditions. The previous identification of potential sites to apply soil and water conservation techniques is a useful tool in the execution of conservation programs that allow optimizing time and resources.

**Keywords:**

Soil and Water Conservation Techniques (TCSA), Multicriteria Analysis Methods (MAM), Hierarchical Analytical Process (AHP), Chota River Basin.

# CAPITULO I

## 1.1. Problema de investigación

La optimización del agua disponible en suelos áridos y semiáridos es la única alternativa que permite mejorar la productividad de la tierra y su paisaje natural. Además, la ocurrencia de intensas lluvias registradas en periodos cortos de tiempo, exigen de forma urgente actividades enfocadas a mitigar la erosión del suelo, capaz de garantizar la productividad agropecuaria. Un papel importante en este desafío es interpretado por las técnicas indígenas de Conservación de Suelo y Agua (CSA), que tienen una gran historia en casi todas las tierras semiáridas del mundo (Bruins, Enenari, & Nessler, 1986). La mayoría de las Técnicas de Conservación de Suelo y Agua (TCSA) tienen por objetivo reducir la escorrentía superficial o hacer un uso más óptimo de las precipitaciones (Lesschen, 2007).

Las TCSA incluyen cosechas de agua (recolección del exceso de flujo de agua para uso en la agricultura), estructuras físicas (barreras vivas, zanjas de infiltración, muros de contención, canales de desviación, control de cárcavas, etc.), prácticas de preparación del suelo y prácticas agronómicas (rotación de cultivos, uso de abonos verdes, cultivos en fajas, reducción de labranza, forestación, etc.) (Critchley & Siegert, 1991; Hudson, 1987; Lesschen, 2007). Las TCSA se enfocan principalmente en disminuir la escorrentía superficial y así conservar el suelo y la humedad in situ, mientras que la técnica de cosecha de agua apunta a la recolección y concentración de la escorrentía superficial para mejorar la disponibilidad de agua y permitir así el desarrollo óptimo de las plantas en un área más pequeña (Critchley & Willcocks, 1994; Oweis, Hachum, & Kijne, 1999).

Diferentes estudios confirman el potencial de las TCSA para mejorar la productividad del agua (Kahinda, Rockström, Taigbenu, & Dimes, 2007; Makurira, Savenije, Uhlenbrook, Rockström, & Senzanje, 2009; Oweis & Hachum, 2006; Tian, Su, Li, & Li, 2003) y reducir la escorrentía superficial y por ende la erosión del suelo (Al-Seekh & Mohammad, 2009; (Alegre & Rao, 1996; Dehn, 1995; Gardner & Gerrard, 2003; Hammad, Haugen, & Borresen, 2004). La adecuada

elección de una individual (TCSA) dependen de sistemas específicos donde intervienen factores como: cantidad de lluvia o precipitación y su distribución en el tiempo, profundidad y tipo de suelo, uso y cobertura del suelo, características topográficas del terreno, factores socioeconómicos locales (Oweis *et al.*, 2006).

Los Métodos de Análisis Multicriterio (MAM), permite evaluar las complejas compensaciones, donde interviene tanto los criterios como las diferentes alternativas (Carver, 1991). Para el presente estudio las alternativas fueron representadas por una TCSA en particular y los multicriterios por factores ambientales específicos de la cuenca. Esta investigación se concentró en terrazas de formación lenta y muros de contención o diques como las TCSA más tradicionales de los Andes, mientras que como criterios se considera a la pendiente del terreno, distribución de las precipitaciones en la cuenca, uso de suelo, propiedades físicas de suelo y aspectos sociales (Critchley *et al.*, 1994). El diseño de las terrazas y muros de contención tienen como principal objetivo servir de barreras para el flujo de agua e interceptar la escorrentía superficial, disminuyendo la velocidad de la escorrentía y fomentando la infiltración (Dorren & Rey, 2004).

Existe una creciente necesidad de generar metodologías que permitan optimizar tiempo y recursos económicos en la determinación de áreas que se adecúen a una TCSA en particular. En la actualidad los Sistemas de Información Geográficas (SIG) cumplen con esta necesidad, los cuales son softwares que permiten generar, almacenar, procesar e interpretar datos espaciales y no espaciales (De Winnaar & Horan, 2007) El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo espacial basado en análisis multicriterio que permitan identificar sitios idóneos para la aplicación de dos técnicas de conservación de agua y suelo en función de seis factores ambientales de la Cuenca del Río Chota.

Actualmente existen diversos estudios que permiten evaluar las TCSA idóneas para una determinada área o superficie (Agarwal, Garg, & Garg, 2013; Kadam, Kale, Pande, Pawar, & Sankhua, 2012; Kahinda, Lillie, Taigbenu, Taute, & Boroto, 2008; Kahinda, Rockström, Taigbenu, & Dimes, 2007; Kahinda, Taigbenu, Sejamoholo, Lillie, & Boroto, 2009; Mbilinyi, Tumbo, Mahoo

& Mkiramwinyi, 2007; Ramakrishnan, Bandyopadhyay & Kusuma, 2009; De Winnaar et al; 2007), sin embargo en la región andina únicamente existen un estudio realizado por Joachim Krois y Achim Schulte publicado en el año 2014, por lo que es de importancia realizar más investigaciones en la región que permitan contrastar los resultados. Se pretende desarrollar una estrategia encaminada a gestionar y proteger el suelo de la cuenca del Río Chota, mediante técnicas de mejoramiento en la disponibilidad de agua y disminución en el arrastre del suelo fértil; Un componente importante en este tipo de estrategia es la implementación de TCSA. En el presente estudio, con la utilización de ARC-GIS y un MAM, se propone evaluar (identifica y clasifica) de forma preliminar los sitios potenciales para una determinada TCSA en la cuenca del Río Chota ubicada en la zona de planificación 1, y sus divisorias de agua se encuentran tanto en la provincia del Carchi como de Imbabura.

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

Aplicar el modelo de análisis multicriterio para la selección de técnicas de conservación de suelo y agua en la cuenca del río Chota, al norte de Ecuador.

#### **1.2.1.1. Objetivos específicos**

- Caracterizar los factores ambientales predominantes de la cuenca del río Chota.
- Identificar sitios idóneos para la aplicación de técnicas de conservación de suelo y agua en la cuenca del río Chota.
- Generar mapas de idoneidad en función de los factores ambientales de la cuenca del río Chota mediante el modelo de análisis multicriterio.

### **1.3. Justificación de la investigación**

La Constitución de la República del Ecuador, en su artículo 409 manifiesta que:

"Considera de interés público y prioridad nacional la conservación del suelo, en especial su capa fértil. Se establecerá un marco normativo para sus protección y uso sustentable que prevenga su degradación, en particular la provocada por la contaminación, la desertificación y la erosión" (Asamblea Nacional del Ecuador [ANE], 2014, p. 181).

Así mismo, en la sección sexta del artículo 411, estima que:

"El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua" (Asamblea Nacional del Ecuador [ANE], 2014, p. 182).

Por su lado el II suplemento de la Ley de los Recursos Hídricos en su segunda sección direcciona la planificación hídrica en los artículos 28, 29 y 30.

Con base a lo anterior, se puede afirmar que en el Ecuador, la constitución ampara toda gestión que permita el desarrollo sostenible y sustentable de una sociedad amigable con el ambiente, sin embargo más de una normativa legislativa, requiere de soporte científico que permita optimizar recursos tanto económicos como de tiempo al momento de tomar decisiones respecto a un problema sea este social, cultural o ambiental. Por tal razón se considera de importancia realizar la investigación, denominada "Aplicación del modelo de análisis multicriterio para la selección de técnicas de conservación de suelo y agua en la cuenca del río Chota, al norte de Ecuador".

### **1.4. Hipótesis**

Las características morfométricas, biofísicas y antrópicas de la cuenca hidrográfica del río Chota indican susceptibilidad a procesos erosivos y a un uso ineficiente del recurso hídrico.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Conservación de suelos y agua

“Medidas de conservación de suelos”, “Manejo y conservación de suelos”, “Técnicas de conservación de suelo y agua”, figuran entre las numerosas expresiones utilizadas para describir los conceptos y prácticas de conservación de suelo y agua. En todas estas definiciones tienen cavida los principales objetivos de conservación de suelo y agua que son: prevenir y controlar la erosión, mejorar el aprovechamiento del agua y la fertilidad de los suelos (Frederick, 2008).

El concepto de conservación de suelos puede definirse como “un sistema que complementa y combina obras estructurales, medidas agronómicas, de fertilidad y agroforestales” (Raudes & Sagastume, 2009). De acuerdo a los mismos autores consideran que éste sistema debe aplicarse de la forma más completa posible, si se desea tener éxito tanto en la protección del suelo como en la productividad y optimización de recursos hídricos.

La recuperación de la capacidad productiva de los suelos de una determinada cuenca, se puede lograr mediante aplicación de medidas o prácticas agronómicas (Tabla 1). Mismas que “permiten principalmente el aumento de la capacidad productiva del suelo mediante sistemas de manejo directo. Estas medidas incluyen prácticas que se realizan en la preparación del terreno para aumentar la producción, pero que tiene el propósito secundario de reducir la escorrentía y la erosión. Además contribuye directamente a mejorar la textura, porosidad y fertilidad del suelo” (Frederick, 2008).

Tabla 1  
Prácticas agronómicas de conservación de suelos

<b>Práctica</b>	<b>Tipo</b>	<b>Características</b>	<b>Beneficios</b>
Labranza	Reducida	Disminución de número de pasos con el tractor	Sustitución de implementos que deterioran el suelo
	Vertical	Cortes verticales en el suelo	solo se utiliza arados de cincel
	Sobre cubierta (mulch)	suelo con cobertura vegetal	Control de malezas, pérdida de humedad e incorporación progresiva de materia orgánica
Abonos orgánicos	Sobre camellones	Siembra sobre camellones	Se puede sembrar sobre resto de cosechas
	Residuos de cultivos	Incorporación al suelo	Parte de las plantas que sobran después de la cosecha
Rotación de cultivos	Lombricultura	Degradación de la materia orgánica por parte de las lombrices	Mejoran las condiciones del suelo
Cultivo múltiple		Sucesión de cultivos diferentes en un mismo lote de terreno	Control de plagas y enfermedades de los cultivos
Abonos verdes		Intercalar diferentes especies en un mismo lote	Control biológico de plagas y enfermedades
Cultivos de cobertura		Producción de material vegetativo exclusivo para incorporar al suelo	Mejora condiciones físicas y químicas del suelo
Barreras vivas		Desarrollar una cobertura vegetal densa	Mantiene al suelo con cobertura vegetal
Cultivos en faja		Siembra en hilera de plantas perennes de alta densidad	Disminuye el poder erosivo del escurrimiento y viento
Cultivo en contorno		Siembra alternada en franjas de cultivos densos con los de menos densidad	Aumenta la infiltración y disminuye la escorrentía
Cortinas rompe vientos		Surcos siguen las curvas a nivel	Aumenta la infiltración y disminuye la escorrentía
		Práctica agroforestal	Disminuye la velocidad del viento

**Fuente:** Manual Práctico de Conservación de Suelos, Frederick (2008)

Otro componente importante dentro de las diferentes técnicas de conservación de suelo y agua son las prácticas mecánicas de conservación de suelo y agua (Tabla 2); que de acuerdo a Frederick, (2008) “se trata de obras de ingeniería para manejar y encauzar las aguas de escorrentía y controlar

las remociones masales de suelo. El manejo de las aguas de escorrentía pretende evitar que volúmenes grandes recorran longitudes largas, cortándolas y evacuándolas hasta lugares adecuados. Algunas prácticas buscan controlar los encharcamientos por medio de obras de drenaje”.

Tabla 2  
Prácticas mecánicas de conservación de suelos

Práctica	Tipo	Características	Beneficios
Zanjas	De absorción	Canales angostos, trazados transversalmente a la pendiente	Almacena temporalmente la escorrentía
	Filtrantes	Canales angostos, trazados transversalmente a la pendiente	Distribuyen las aguas residuales sobre un lecho de tierra vegetal, grava o arena
	Trinchera	Canal con capacidad de almacenamiento de agua mayor al m <sup>3</sup>	Retiene grandes cantidades de agua
Terrazas	De desviación	Evitan los encharcamientos de los lotes	Canalizar la escorrentía excedente y desviarle a salidas adecuadas
	De retención	Son terrazas a nivel	Conserva las aguas superficiales permitiendo optimizar las precipitaciones de un sector
Banco	Banco	Su uso se generaliza en suelos con pendientes pronunciadas	Permiten cultivar en suelos con pendientes pronunciadas
		Se recomienda su uso en lugares de alta precipitación	Interceptan, desvían y transportan el agua de escorrentía
Barreras de piedra		Colocación de piedras sobre el terreno en sentido perpendicular a la pendiente	Disminuye la velocidad de agua de la escorrentía
Diques para el control de cárcavas		Contrarresta el progreso de las cárcavas	Protege el corte de las cabeceras de las cárcavas (surcos escavados por la escorrentía superficial)
Muro de contención o diques		Se elaboran con materiales del lugar sean estos: piedras, tierra, sacos llenos de arena etc.	Recuperación del suelo y aprovechamiento de la escorrentía superficial

**Fuente:** Manual Práctico de Conservación de Suelos, Frederick (2008)

En esta investigación prevalecen las terrazas y muros de contención o diques como prácticas mecánicas de conservación de suelo y agua, por lo que a continuación se describe con mayor detalle mencionadas técnicas.

Una terraza es un terraplén de tierra construido de forma perpendicular a la pendiente siguiendo las curvas a nivel o con una mínima inclinación que permita desalojar el agua superficial a una reducida velocidad, su principal objetivo es reducir la erosión hídrica, eliminar el exceso de agua y captar la escorrentía en lugares donde las precipitaciones son reducidas, es una de las técnicas de conservación de suelo y agua más prácticas y económicas. (Seleshi, Philippe & Taffa , 2009).

Seleshi *et al.*, (2009) los muros de contención o diques son una medida de conservación que permite retener el agua mediante la obstrucción, evitando el arrastre del suelo; su principio se basa en aumentar el tiempo de concentración de la escorrentía superficial producto de las precipitaciones, por lo que se logra una mayor infiltración de agua permitiendo optimizar las lluvias registradas.

### **2.1.1. Normativa internacional**

De acuerdo a la (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAO], 2015); en el objetivo 12 del desarrollo sostenibles, habla sobre la producción y consumo responsable, señalando que para alimentar a la población mundial de forma sostenible, los productores tienen que producir más alimento, minimizando los impactos ambientales negativos, tales como la pérdida de suelo, agua y nutrientes. Así mismo, considera que suelo y agua son recursos estratégicos que contribuyen a la seguridad alimentaria y la generación de servicios ecosistémicos por lo que La Asamblea General de Naciones Unidas ha proclamado el 2015 como el Año Internacional de los Suelos, para resaltar la importancia de estos recursos.

### **2.1.2. Normativa nacional**

En la CRE se establece varios artículos a favor de la conservación y cuidado de los recursos naturales teniendo al **Art 71**. La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos, **Art 74**. Las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades tendrán derecho a beneficiarse del ambiente y de las riquezas naturales que les permitan el buen vivir. De igual forma en el **Art. 14.-** Se reconoce el derecho de la

población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*. **Art. 406.-** El Estado regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos y manglares, ecosistemas marinos y marinos-costeros. Como institución estatal el Ministerio del Ambiente, como agente regulador, mantiene entre sus principales funciones y objetivos **Art. 5.** b) Velar por la conservación y el aprovechamiento racional de los recursos forestales y naturales existentes; e) Elaborar y ejecutar los planes, programas y proyectos para el desarrollo del subsector, en los campos de forestación, investigación, explotación, manejo y protección de bosques naturales y plantados, cuencas hidrográficas, áreas naturales y vida silvestre.

COOTAD , Artículo 136.- Ejercicio de las competencias de gestión ambiental.- Los gobiernos autónomos descentralizados parroquiales rurales promoverán actividades de preservación de la biodiversidad y protección del ambiente para lo cual impulsarán en su circunscripción territorial programas y/o proyectos de manejo sustentable de los recursos naturales y recuperación de ecosistemas frágiles; protección de las fuentes y cursos de agua; prevención y recuperación de suelos degradados por contaminación, desertificación y erosión; forestación y reforestación con la utilización preferente de especies nativas y adaptadas a la zona; y, educación ambiental, organización y vigilancia ciudadana de los derechos ambientales y de la naturaleza.

## **2.2. Escurrimientos superficiales**

El cálculo de los escurrimientos superficiales (componente del ciclo hidrológico el cual resulta de la lluvia y/o caudal lateral que no llega a infiltrarse sobre la superficie de la tierra) se considera para dos objetivos:

- a) el escurrimiento medio, para estimar el volumen de agua por almacenar o retener.
- b) los escurrimientos máximos instantáneos para el diseño de obras de conservación.

### 2.2.1. Esgurrimiento medio

Para calcular el esgurrimiento medio en cuencas pequeñas o áreas de drenaje reducidas, es necesario conocer el valor de la precipitación media anual, el área de drenaje y su coeficiente de esgurrimiento. La fórmula a utilizar sería la siguiente:

$$(SARH-CP, 1982) Vm = C * Pm * A \quad (1)$$

Dónde:

$Vm = \text{Volumen medio que puede escurrir (m}^3\text{)}$

$A = \text{Área de la cuenca (ha)}$

$C = \text{Coeficiente de escorrentía (adimensional)}$

$Pm = \text{Precipitación media anual (mm)}$

Para aplicar esta fórmula, es indispensable determinar cada uno de los factores que en ella intervienen y para lograrlo deben seguirse los pasos siguientes:

- a) Se obtiene el valor del coeficiente de esgurrimiento (C), de la tabla 3 de acuerdo con los tipos de suelos, uso del suelo y pendiente. Cuando el área de drenaje presenta diferentes tipos de suelos, vegetación y pendiente media. El coeficiente de esgurrimiento (C), se obtiene para cada área parcial y posteriormente se calcula el promedio ponderado para aplicarlo en la ecuación.
- b) Se obtiene el área de drenaje por medio de cartas topográficas, fotografías aéreas o por un levantamiento directo en el campo.
- c) Se localiza el área en estudio mediante fotografías aéreas las cuales se procesan mediante herramientas GIS, las que permiten delimitar la cuenca a estudiar, mapas de isoyetas utilizando las medias anuales lo que más adelante permite determinar la precipitación media anual de la cuenca. En el caso de requerir mayor precisión en los cálculos se recurre a la estación meteorológica más cercana al área de estudio y se obtienen los registros anuales y/o mensuales de precipitación pluvial media. Con esos valores se determinan los volúmenes medios anuales esgurridos.

- d) Con esta información se procede a calcular los volúmenes medios escurridos mediante la ecuación

Tabla 3

Valores del Coeficiente de escurrimiento (C) y límites de las clases texturales del suelo de la FAO

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura del suelo según el % de								
	arena	limo	arcilla	arena	limo	arcilla	arena	limo	arcilla
	65-100	0-35	0-18	0-82	0-100	0-35	0-65	0-65	35-100
	Gruesa			Media			Fina		
<b>Bosque</b>									
Plano (0-5% pendiente)	0.10			0.30			0.40		
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25			0.35			0.50		
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30			0.50			0.60		
> a 30%	0.32			0.42			0.63		
<b>Pastizales</b>									
Plano (0-5% pendiente)	0.10			0.30			0.40		
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16			0.36			0.55		
Escarpado (11-30% pendiente)	0.22			0.42			0.60		
> a 30%	0.37			0.47			0.68		
<b>Terrenos cultivados</b>									
Plano (0-5% pendiente)	0.30			0.50			0.60		
Ondulado (6-10% pendiente)	0.40			0.60			0.70		
Escarpado (11-30% pendiente)	0.52			0.72			0.82		
> a 30%	0.53			0.74			0.84		

Fuente: Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión TRAGSA (1994)

### 2.2.2. Escurrimiento máximo instantáneo

Para estimar el escurrimiento máximo instantáneo que sirve para el diseño de obras de excedencia, se puede estimar para diferentes periodos de retorno por el método racional modificado o por el método de las curvas numéricas o del SCS (USA).

### 2.2.2.1. Método racional modificado para estimar escurrimientos máximos

El método racional modificado para estimar escurrimientos máximos, consiste en utilizar los valores intensidad de la lluvia para diferentes periodos de retorno y el área de drenaje para estimar los escurrimientos máximos instantáneos. La modificación propuesta por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos - Colegio de Posgraduados (SARH-CP) consiste en utilizar la lluvia máxima en 24 horas para diferentes períodos de retorno, en lugar de la intensidad de la lluvia, tal y como se muestra en la ecuación siguiente:

$$(SARH-CP,1982) Qp = \frac{CLA}{360} \quad (2)$$

Dónde:

$Qp$  = *Escurrimiento máximo instantáneo (m<sup>3</sup>/s)*

$C$  = *Coficiente de escurrimiento*

$L$  = *Lluvia máxima en 24 horas para un período de retorno dado (mm)*

$A$  = *Área de drenajes (ha)*

360 = *Factor de ajuste de unidades*

Para la utilización de esta ecuación, se siguen los pasos que a continuación se señalan:

- a) El área de la cuenca se determina mediante fotografías aéreas las cuales se procesa en GIS y el coeficiente de escurrimiento se obtiene de la Tabla 3.
- b) Se determinar la lluvia máxima en 24 horas para un período de retorno deseado. Para lo que se recomienda utilizar estadística de probabilidades, observando los datos históricos de las precipitaciones y posteriormente su periodo de retorno.

### 2.2.2.2. Método de las curvas numéricas o del SCS (USA)

Para estimar el escurrimiento medio por evento y el máximo instantáneo se utiliza el método de las curvas numéricas, el cual utiliza los datos de precipitación por evento o la precipitación máxima para un periodo de retorno deseado y el máximo potencial de retención del agua del suelo, la información y procedimiento necesario para aplicar éste método son los siguientes:

#### 2.2.2.2.1. Escorrentía

La cuantificación de la escorrentía superficial se determina a través de la metodología del número de curvas (CN), elaborada por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS-CN), actualmente Servicios de Conservación de los Recursos Naturales (NRSC 2004), lo que más tarde permitirá espacializar el coeficiente de escurrimiento; la ecuación siguiente nos permitirá determinar el escurrimiento medio de la cuenca en estudio.

$$(NRSC, 2004) Q = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a+S)} \quad (3)$$

Dónde:

$Q$  = *escurrimiento medio en mm.*

$P$  = *Precipitación por evento en mm.*

$I_a$  = *Abstracción Inicial*

*Para la presente investigación su valor será de 0.2 según lo recomendado por NRSC .*

$S$  = *Retención máxima potencial en mm.*

Como el potencial máximo de retención de agua del suelo ( $S$ ) depende de las condiciones del suelo, vegetación y manejo del cultivo, entonces es factible relacionarlo con las curvas numéricas, las cuales son función de los factores antes mencionados. El potencial máximo de retención ( $S$ ) se puede obtener de acuerdo a la siguiente relación:

$$(NRSC, 2004) S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (4)$$

Dónde:

$S = \text{Potencial máximo de retención en mm}$

$CN = \text{Curvas Numéricas (adimensional)}$

Debido que las Curvas Numéricas (CN) son similares al coeficiente de escorrentía, las mismas que fueron obtenidas a través de la observación de hidrogramas procedentes de varias tormentas en diferentes cuencas de los Estados Unidos por el Servicio de Conservación de Suelos publicado por la NRSC en el año 2004.

Estas curvas dependen del tipo de suelo, condiciones hidrológicas de la cuenca, usos del suelo y humedad antecedente

#### **2.2.2.2.2. Tipo de suelo**

Utilizando las características texturales de los suelos (>3000) el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) clasificó a aquellos en cuatro grupos hidrológicos A, B, C y D considerando sus características para producir escurrimiento.

#### **2.2.2.2.3. Condiciones hidrológicas de la cuenca**

Este indicador depende de la cubierta vegetal y su variación depende de la densidad de la cobertura de tal manera que se agrupa en tres grupos buenos, regulares y malos (*Ver Tabla 4*).

#### **2.2.2.2.4. Usos del suelo**

La utilización de los terrenos ya sea como áreas de cultivo, pastizales y bosque tienen influencia en el escurrimiento y esto es más notorio cuando además de la cubierta vegetal se desarrollan tratamientos al suelo o se realizan sistemas de siembra en hilera, tupidos en surcos rectos o al contorno etc.

Tabla 4

Curva numérica (CN) para estimar la escorrentía

Cobertura y manejo del suelo			Grupo de suelos			
Uso del Suelo	Tratamiento o práctica	Condición Hidrológica	A	B	C	D
			Curva numérica			
Suelo en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
Cultivo de escarda	Curva a nivel	Mala	70	79	84	88
	Curva a nivel	Buena	65	75	82	86
	Terraza y curva a nivel	Mala	66	74	80	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	62	71	78	81
	Surcos rectos	Mala	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curva a nivel	Mala	63	74	82	85
Cultivos tupidos	Curva a nivel	Buena	61	73	81	84
	Terraza y curva a nivel	Mala	61	72	79	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	59	70	78	81
	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curva a nivel	Mala	64	75	83	85
	Curva a nivel	Buena	55	69	78	83
Leguminosas en hilera o forraje en rotación	Terraza y curva a nivel	Mala	63	73	80	83
	Terraza y curva a nivel	Buena	51	67	76	80
	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	89
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curva a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
Pastizales	Curva a nivel	Buena	6	35	70	79
	Pasto de corte	Buena	30	58	71	78
		Mala	45	66	77	83
	Bosque	Regular	36	60	73	79
Caminos de tierra		Buena	25	55	70	77
		Buena	72	82	87	89
	Caminos pavimentado	Buena	74	84	90	92

FUENTE: Servicios de Conservación de los Recursos Naturales (NRSC año 2004)

### 2.2.2.2.5. Humedad antecedente

Es de esperarse que el escurrimiento aumente a medida que se existe mayor humedad del suelo al momento de presentarse la tormenta. Por esa razón, en este método la condición de humedad del suelo producto de los cinco días previos a la tormenta son considerados y agrupados en tres grupos I, II, III, lo que le da un carácter dinámico a la estimación del escurrimiento, lo descrito anteriormente se ilustra en la Tabla 5 (SARH-CP, 1982).

Tabla 5  
Valores para cada condición de humedad antecedente

<b>Condición de humedad antecedente</b>	<b>Precipitación acumulada de los cinco días previos al evento (mm)</b>
I	0 - 12.7
II	12.7 – 38.1
III	> 38.1

**FUENTE:** Servicios de Conservación de los Recursos Naturales (NRSC año 2004)

Cuando se haya seleccionado el valor de CN de la Tabla 4, se obtendrá un valor que está dado por la condición de humedad antecedente intermedia (II), por tal razón, se considerará los datos de precipitación de los cinco días previos al evento que se desea utilizar para la predicción del escurrimiento, y si esto es menor de 12.7 mm la condición de humedad antecedente es seca (I) y en la Tabla 6, se buscará el nuevo valor de CN que corresponde a esta condición. Cuando la precipitación es mayor de 38.1 mm, se buscará el valor de la condición de humedad antecedente en humedad (III) (SARH-CP, 1982).

Tabla 6  
Curva numérica para tres diferentes condiciones de humedad

<b>CN correspondientes a</b>		
<b>Condición I</b>	<b>Condición II</b>	<b>Condición III</b>
100	100	100
87	95	98
78	90	96
70	85	94
63	80	91
57	75	88
51	70	85
45	65	82
40	60	78
35	55	74
31	50	70
26	45	65
22	40	60
18	35	55
15	30	50
12	25	43
9	20	37
6	15	30
4	10	22
2	5	13

**FUENTE:** Servicios de Conservación de los Recursos Naturales (NRSC año 2004)

Es importante tener en cuenta que el método de curvas numéricas sólo es aplicable a eventos de tormentas individuales, por lo que no es recomendable aplicar datos acumulados sean estos mensuales o anuales, para lo que se recomienda trabajar con datos históricos de precipitación aplicando estadísticas que permitan determinar periodos de retorno los cuales son los insumos a utilizar en éste método (SARH-CP, 1982).

### **2.3. Análisis Multicriterio**

El proceso de toma de decisiones multicriterio es una herramienta de soporte para la toma de decisiones en la cual un conjunto de alternativas es evaluado con base en los criterios, los cuales se refieren a dos conceptos: los objetivos (definidos por intereses particulares) y los factores

(definido por la caracterización del ambiente) (Mendoza, Geneletti, Moralea, López, Isdrade, Verekerdy, 2008).

Triantaphyllou (2000) en términos generales, el análisis multicriterio es dividido en dos ramificaciones principales: la toma de decisiones multiobjetivo y la toma de decisiones multiatributo. En el primer caso se estudian las decisiones en un espacio de decisión continuo, mientras que en el segundo caso el proceso de toma de decisiones se concentra en problemáticas con espacios de decisión discretos. En este último caso, el conjunto de decisiones incluye un número finito de posibles alternativas predeterminadas.

Mendoza *et al.*, (2008) menciona que, antes de la integración con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), por lo regular los MAM tenía un carácter aespacial, es decir, se suponía que había una homogeneidad espacial dentro del área de interés. Esta suposición es irreal debido a que, por lo general, las características que están siendo evaluadas presentan variación en el espacio. Con la relación complementaria entre el MAM y la tecnología de los SIG, el tomador de decisiones cuenta con más información acerca de la distribución espacial de los valores de los criterios y acerca de las características espaciales de las alternativas.

En el MAM los datos geográficos son transformados en una decisión. Malczewski (como se citó en Mendoza *et al.*, 2008), “al análisis espacial multicriterio compromete la evaluación de fenómenos geográficos con base en valores de criterios y las preferencias de los tomadores de decisiones respecto a un conjunto de evaluación”.

Anselin y Meire (1989) citado por Mendoza *et al.* (2008), “el MAM es visto como una herramienta flexible de toma de decisiones en la cual los aspectos subjetivos de la evaluación son hechos más explícitos y las preferencias, prioridades y juicios del (de los) tomador(es) de decisiones o evaluador(es) son incorporados dentro de un marco consistente y estructurado”.

## **2.3.1. Componente de un árbol de criterios**

### **2.3.1.1. Limitantes**

Un limitante es un criterio que determina cuales áreas son incluidas o excluidas del análisis de aptitud: las áreas excluidas se calificarán como de nula aptitud (0) mientras que a las áreas incluidas se les asignará un índice de aptitud entre 0 y 1. Los limitantes son criterios duros que no pueden ser compensados por otro limitante o factor (Mendoza *et al.*, 2008).

### **2.3.1.2. Factores**

Voogd, 1983 citado por Mendoza *et al.*, (2008), “Un factor es un criterio blando que contribuye a la aptitud en cierta medida. Los factores pueden ser de dos tipos atendiendo al signo de su calificación”:

- Factores de beneficio: contribuyen positivamente al resultado; entre más se tenga, más alto el valor y mejor será el resultado.
- Factores de costo: contribuyen negativamente al resultado; entre menos se tenga, menor será el valor y mejor será el resultado.

Mendoza *et al.*, (2008) manifiesta que a diferencia de los limitantes, los factores pueden ser compensados por otro factor de modo que en un área con altos valores de factor(es) de costo éstos pueden compensarse por la presencia de altos valores de factor(es) de beneficio, por lo cual la aptitud total de dicha área representará las relaciones entre ambos valores.

Sharifi & Herwinjen (2004) considera que los factores deben reunir los atributos mostrados en la tabla 7.

Tabla 7  
Atributo de los criterios e indicadores

<b>Atributo</b>	<b>El indicador debe</b>
	Incluir aspectos claves
Importante	Estar relacionado al objetivo de evaluación y ser sensible y responsivo al cambio en el sistema
Analítico	Ser confiable, Estar fundamentado por la teoría y proporcionar una medición integral
Mensurable	Fácil de detectar, registrar e interpretar
	Ser eficiente en costos y estar definido con precisión.

**Fuente:** Spatial Decision Support Systems. ITC . Sharifi, A. y Herwinjen, M. van (2004)

### 2.3.2. Valorización parcial

En general, los criterios empleados en el MAM tienen naturaleza diversa, por lo tanto, son representados mediante valores y escalas distintas. No obstante, el MAM exige que los criterios sean comparables entre sí y, a veces, que éstos puedan ser combinados, para ello es necesario transformar los valores de los diferentes criterios a unidades comparables: es decir, deben pasar por un proceso de normalización o estandarización (Mendoza *et al.*, 2008); en la tabla 8 se resume los más importantes métodos de estandarización.

Tabla 8  
Resumen de los métodos más importantes de estandarización

<b>Estandarización</b>	<b>Método</b>
Máximo	El registro es dividido entre el valor absoluto más alto
Intervalo	Se aplica una función lineal entre los valores absolutos mínimos y máximos
Meta	Se aplica una función lineal entre el valor meta real o hipotético del rango y el valor mínimo

**Fuente:** Uso de Técnicas de Análisis Multicriterio para la priorización de subcuencas y municipios para la conservación, restauración y aprovechamiento de los recursos naturales en la cuenca del lago Cuitzeo Mendoza, M., Gonzales, D., Geneletti, D., Morales, L., López, E., Isdrade, I., y otros. (2008).

### **2.3.3. Análisis de jerarquía**

El Análisis de Jerarquía (AJ), desarrollado por Saaty (1980), es un método para abordar problemas de decisión multicriterio en el cual cada problema pasa por un proceso de desagregación (análisis) y rearreglo jerárquico de sus componentes principales. La total descomposición analítica del problema de decisión es aplicada para generar una jerarquía de cúmulos anidados, en la cual cada cúmulo se descompone en otros subordinados. El arreglo jerárquico debe responder a objetivos determinados. Tal arreglo de cúmulos constituye una abstracción de la estructura del sistema analizado que permite comprender mejor las relaciones funcionales entre los componentes y el impacto sobre el sistema de cada uno de estas partes (Saaty, 1980). El proceso no requiere de valores numéricos para relacionar los criterios de un cúmulo que representa alguno de los aspectos del problema y posibilita el empleo de juicios subjetivos carentes de escala de medición para establecer la importancia relativa de los criterios, de acuerdo al objetivo común buscado. Tales juicios subjetivos son utilizados para derivar la importancia relativa de manera cuantitativa para los criterios de decisión y las opciones (Dyer & Forman, 1992).

### **2.3.4. Comparación Pareada**

Uno de los aspectos clave del (MAM) se refiere al cálculo de ponderaciones que reflejen la importancia relativa de cada opción dentro de un problema de decisión con múltiples atributos. Saaty (1980) introdujo el uso de la Matriz de Comparación Pareada (MCP) en el (AJ). La MCP permite al tomador de decisiones asignar un valor de comparación a cada uno de los pares de criterios, resultando en una matriz conteniendo valores comparados para cada par de criterios, la cual es transformada a una escala verbal asociada a valores de 1-9 (Tabla 9). El cálculo de la MCP establece la importancia relativa de cada elemento en cada cúmulo dentro del árbol jerárquico (Mendoza *et al.*, 2008).

Tabla 9  
Escala de valores para la comparación pareada

<b>Expresión Numérica</b>	<b>Valoración de idoneidad</b>	<b>Importancia comparativa</b>
1	No adecuado	Igual importancia
3	Ligeramente adecuado	Moderada importancia de uno sobre otro
5	Moderadamente adecuado	Elemento fuertemente favorecido
7	Altamente adecuado	Elemento muy fuertemente favorecido
9	Optimo	Extrema importancia
2,4,6,8,	Valores intermedios entre dos juicios	Usado como valores de consenso entre dos juicios
0	No hay relación	El elemento no contribuye al objetivo

**Fuente:** Escala de importancia comparativa (Saaty 1990)

En la matriz de comparación existe reciprocidad entre los elementos colocados arriba y debajo de la diagonal en la MCP, como se ilustra con un ejemplo en la Tabla 10, mostrando una relación inversa entre unos y otros. En este ejemplo, el criterio A presenta una ligera importancia para lograr lo deseado respecto al criterio B, o que el A es tres veces más preferido que B y, por lo tanto, la importancia de B es 1/3 de la de A.

Tabla 10  
Matriz de comparación pareada (MCP)

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>A</b>	1	3	8
<b>B</b>	0.33	1	5
<b>C</b>	0.125	0.2	1

Según Malczewski 1999 citado por Mendoza *et al.*, (2008), uno de los métodos para establecer la ponderación de los criterios es:

- a. Sumar los valores de cada columna de la MCP.
- b. Normalizar la MCP dividiendo cada celda de la matriz por el total de su columna.
- c. Calcular el promedio de las celdas de cada fila de la matriz normalizada dividiendo la suma de los valores normalizados en cada fila entre el número de criterios.

Tabla 11  
 Calculo de la ponderación

Paso	a) MCP			b) MCP normalizada			c) Calculo de promedio
Criterio	A	B	C	A	B	C	Peso
<b>A</b>	1	3	8	0.687	0.714	0.571	$(0.702+0.714+0.571)/3 = 0.658$
<b>B</b>	0.33	1	5	0.227	0.238	0.357	$(0.227+0.238+0.357)/3 = 0.274$
<b>C</b>	0.125	0.2	1	0.086	0.048	0.071	$(0.086+0.048+0.071)/3 = 0.068$
Suma	<b>1.46</b>	<b>4.20</b>	<b>14.00</b>				

Al aumentar el número de elementos comparados en la MCP se vuelve más difícil controlar la consistencia en las preferencias pero el AJ no demanda una consistencia perfecta, aceptándose un valor de inconsistencia de un 10% o menor (Mendoza *et al.*, 2008).

## **CAPITULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Tipo de investigación**

El enfoque de la presente investigación fue cuantitativa no experimental puesto que los datos a procesar para el cálculo de variables como precipitación, escorrentía, entre otras se utilizará fuentes secundarias como estaciones meteorológicas y la tabla de valores de la conservación de los recursos naturales; además, para determinar los valores en las variables será indispensable sistematizar procedimientos de forma secuencial, que permite hacer proyecciones y presunciones en función de las estadísticas y los valores generados.

Respecto al alcance de la investigación se considera que fue exploratoria, pues generó aproximaciones de la escorrentía en función de las precipitaciones, información que permitirá promover técnicas de cosecha de agua; debido que el estudio pretende relacionar las características de cinco variables se aprecia que también tiene un alcance correlacionar.

#### **3.2. Ubicación**

La cuenca del río Chota se encuentra ubicada al norte del Ecuador entre las coordenadas UTM 844373.56 y 10054073.31 (centroides X e Y respectivamente). La cuenca cubre una superficie de 1920 km<sup>2</sup>, de los cuales el 66% corresponde a la provincia del Carchi y el restante 34% a Imbabura. Sus divisorias de aguas suman un perímetro de 242.23 Km; la cota máxima se encuentra a 4237 msnm y la mínima a 1509 msnm. Su cauce principal alcanza una longitud de 84.64 Km y se forma a partir de los ríos Mataquí y Escudillas (datos obtenidos de ALOS PALSAR Global Radar Imagery, 2006-2011 y procesados en ArcMap 10.2).

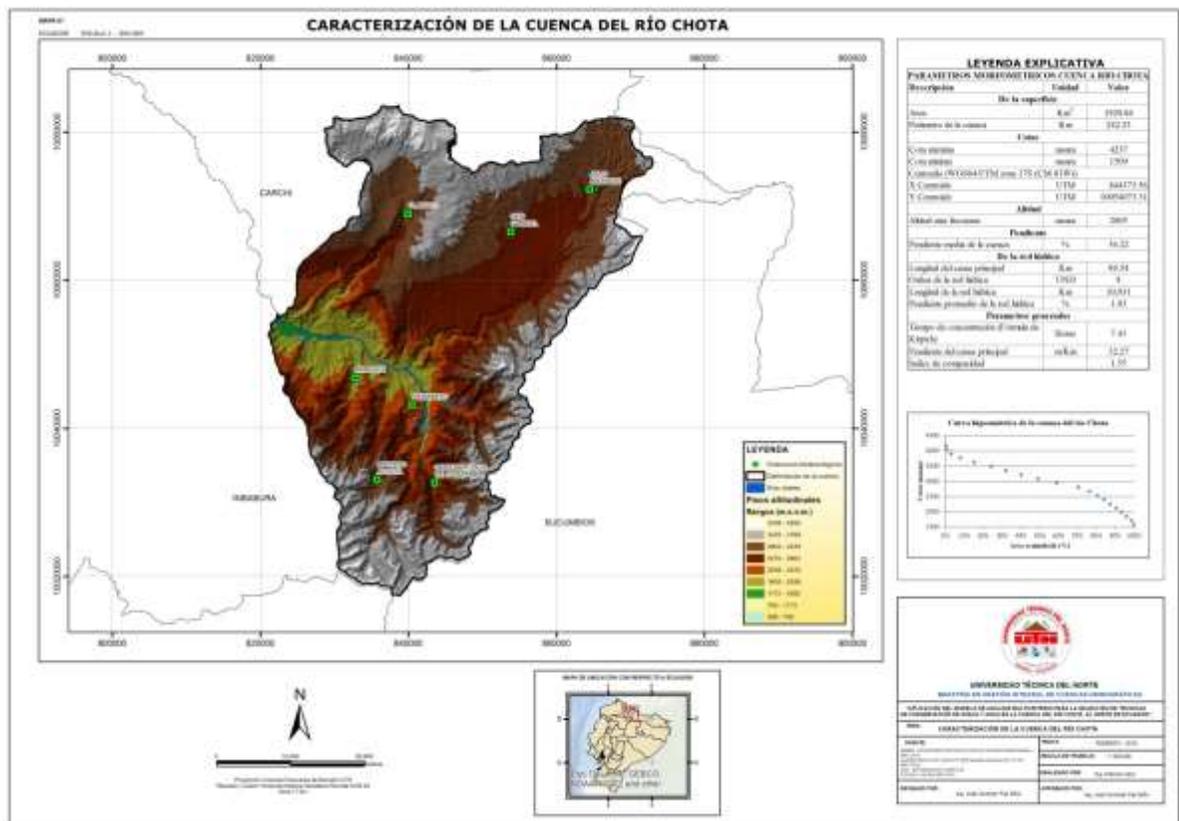


Figura 1. Ubicación del área de estudio

### 3.3. Métodos

#### 3.3.1. Teórico

Para la presente investigación prevaleció el método teórico lógico; empezando con el hipotético (se considera que en la cuenca a estudiar los criterios ambientales favorecen al menos a una técnica de conservación de suelos y agua); además se estimó causal, puesto que existe una estrecha relación entre los factores ambientales de la cuenca y su grado de conservación o degradación, misma que se procedió a descifrar mediante el presente estudio.

### **3.3.2. Empírico**

Se empleó fórmulas en el cálculo hidrológico y en el MAM, las que han sido justificadas teóricamente y su efectividad ha sido evaluada de forma empírica a través de métodos como la observación y medición aplicándoles a diferentes situaciones reales con aspectos tangibles.

### **3.4. Flujo de Trabajo**

Toda la información requerida y utilizada fueron mapas de cobertura espacial transformados a vector o shapefile, cada uno de ellos representaron un factor ambiental (variables) en particular, los cuales determinaron la implementación de una técnica de conservación de suelo y agua en la cuenca. El procedimiento para evaluar la presente investigación, consta de cuatro pasos posteriores indicados en la siguiente figura:

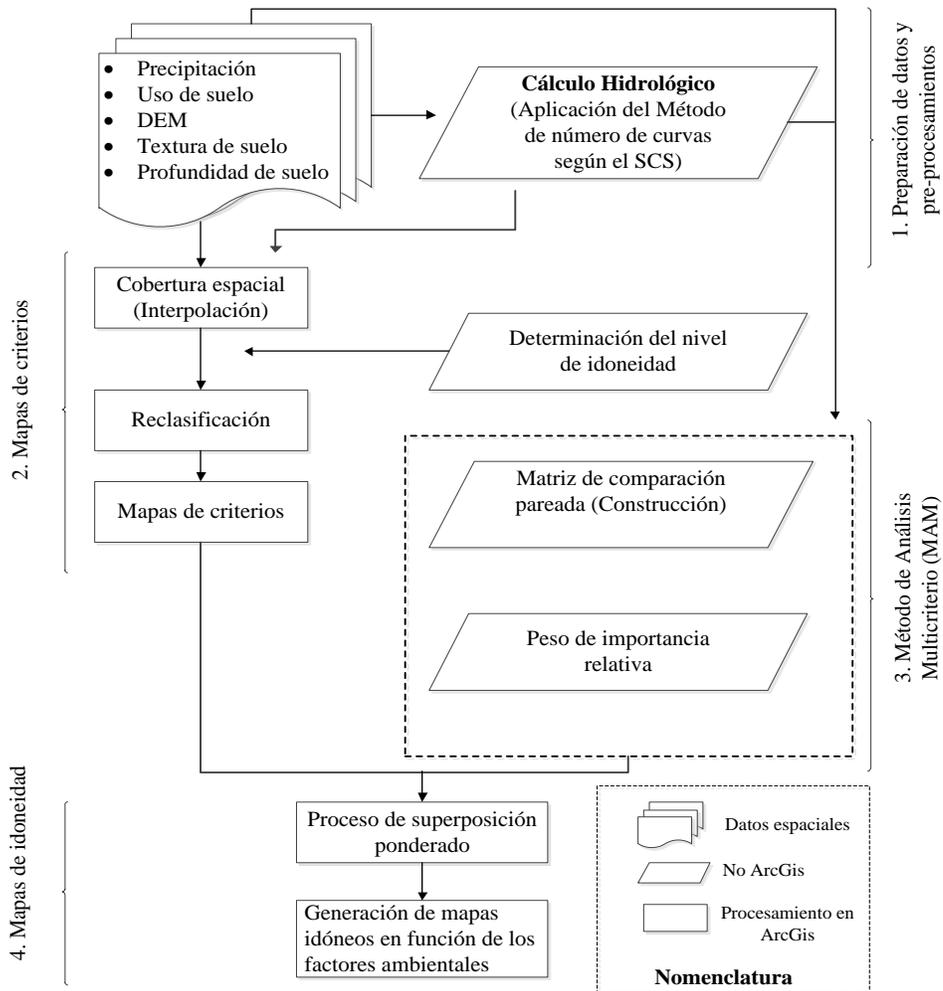


Figura 2. Flujo de trabajo

### 3.5. Preparación de los datos de entrada y pre-procesamiento

Según lo citado por Kahinda *et al.* (2008), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) enumera seis factores (variables) claves que deben ser incluidos en el proceso de evaluación para determinar la aplicación de una técnica de conservación de suelo y agua en una cuenca. Para la presente investigación, se consideró lo recomendado por la FAO y se hizo hincapié en los factores ambientales: clima, hidrología, topografía, suelos y agronomía.

En la presente investigación los parámetros de clima fueron representados por la precipitación, la hidrología por la escorrentía, la topografía por la pendiente, el factor suelo por la textura, estructura y profundidad del suelo y la agronomía por la cobertura y uso de la tierra.

### **3.5.1. Precipitación**

Para determinar esta variable se recurrió a los datos de precipitación de siete pluviómetros (registros que contenían frecuencia diaria, y un historial de 34 años, desde 1980 al 2014) ubicados en el valle interandino del Chota, los cuales fueron incorporados en el proceso de evaluación de la cuenca y para la obtención de mencionados datos se gestionó al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) del Ecuador.

Debido a que existían días sin precipitación, fue necesario remplazar con los datos de estaciones cercanas mediante el método de regresión lineal; para lo que se estableció una regresión y correlación lineal. El coeficiente de correlación ( $r$ ) fue el instrumento estadístico que permitió determinar la mejor estación vecina. Luna y Lavado, (2015) menciona que en términos hidrológicos, se considera aceptable un valor de  $-0.8 \leq r \leq 0.8$ . En el anexo 1 se puede verificar los coeficientes de relación existentes con las mejores estaciones vecinas; a excepción de la estación San Francisco de Sigsipamba todas tienen un valor altamente significativo al nivel del 99% de probabilidad estadística. Demostrando un alto grado de asociación entre las estaciones contrastadas.

La simetría de los datos de precipitación entregados por el INAMHI, se realizó a través de estimadores estadístico, el Coeficiente de Variación (Anexo 2) permitió determinar el porcentaje de variabilidad que existe entre los datos procesados. En el presente estudio se calculó la cantidad de lluvia sobre la cuenca en base a las isoyetas (Anexo 3), generadas con la información de las precipitaciones registradas en siete estaciones distribuidas a diferentes pisos altitudinales (1880 m.s.n.m. hasta los 3000 m.s.n.m.) de la unidad hídrica en estudio, de las cuales cuatro se encuentran en la provincia de Imbabura y tres en Carchi.

Con el fin de garantizar la confiabilidad de la presente investigación. Se contrastó los datos de precipitación, aplicando el modelo de regresión lineal para la recuperación de datos faltantes con

los promedios anuales de las estaciones meteorológicas publicadas en el estudio Hidrológico del río Mira al año 2005. Las variaciones respectivas se detallan en el anexo 4; únicamente la estación Mariano Acosta no se pudo contrastar por falta de información de la fuente oficial INAMHI.

Para determinar las precipitaciones máximas diarias, fue necesario calcular el periodo de retorno utilizando el método de Weibull, mismo que responde a la siguiente ecuación:

$$(Weibull, 1939) T = (n+1)/m \quad (5)$$

Donde

T= periodo de retorno (en años)

n= número total de datos

m= número de orden de la serie arreglada en forma creciente

Y con esto se pudo calcular la probabilidad de excedencia de que la precipitación sea igualada o superada aplicando la siguiente relación.

$$(Weibull, 1939) P = (1/T) 100\% \quad (6)$$

De acuerdo a Pizarro, Flores, Sanguesa, Martinez, y Garcia , (2004) recomiendan realizar obras de conservación de suelos que permitan al menos dar mantenimiento cada año; por lo que en la presente investigación se consideró importante la precipitación máxima diaria registrada a un periodo de retorno de un año, tomando en cuenta además la probabilidad de que iguale o supere a dicho evento.

### **3.5.2. Escorrentía**

Para caracterizar a la cuenca en estudio desde el enfoque hidrológico (escorrentía), se aplicó la metodología del Número de Curva utilizando ArcGIS. Método que permitió estimar el escurrimiento medio (Q) mediante la cantidad de precipitación (P) y retención máxima potencial (S), utilizando valores de curvas numéricas preestablecidas y evaluadas de forma empírica. La ecuación (3) se utilizó para obtener Q.

Y la retención máxima potencial se obtuvo mediante curvas numéricas, de acuerdo con la ecuación (4):

Como se puede observar, para desarrollar la variable escurrimiento fue necesario empezar determinando los números de curva de la cuenca. Para lo que se utilizó el procedimiento automático del número de curva con sistemas de información geográfica planteada por Ferrer, Rodríguez, y Estrela,(2005). Los cuales se sustentan en un principios de los numeros primos (el producto de los números primos siempre dará un número diferente). A cada una de las variables que intervienen en la obtencion del número de curva se le asigno un número primo, considerando que la característica hidrológica fueron unicas; los datos de entrada se reclasificaron con estos nuevos valores. Lo que nos permitió convinar las capas de información y obtener así el número de curva.

A continuación se describe el proceso seguido para generar los mapas matriciales (también llamados capas de información) de cada una de las variables (pendiente; tipo de suelo y uso del suelo) que intervienen en la determinación del número de curva, y la forma en que se superponen y establecen las relaciones necesarias para generar dicho mapa. En el presente trabajo, se ha utilizado el ArcGIS 10.2.

Para obtener el mapa de pendientes se necesitó un DEM en formato raster, el cual se obtuvo del sistema Alos Palsar del Alaska Satellite Facility. Se le clasificó en dos grupos: menor del 3% y mayor o igual al 3%. El mapa resultante se obtuvo en forma de porcentaje; al que se reclasificó en dos categorías (números primos), mismo que permitió generar un nuevo mapa que tiene las siguientes categorías: 2 para todas aquellas celdas en las que la pendiente fue menor al 3% y 3 para aquellas mayor al 3%.

Otra variable necesaria para determinar el número de curva es el mapa de tipos de suelo. Para la presente investigación se utilizó el shapefile de geopedología generada por SIGTIERRAS a escala 1:25000. Y la variable utilizada fue drenaje del suelo. Mapa que se clasificó en los cuatro grupos que establece el SCS y al igual que la variable anterior se designó un número primo tal como se detalla en el anexo 5.

La tercera y última variable que interviene en la obtención del valor del número de curva, es el uso y cobertura del suelo. La información cartográfica que contiene esta variable fue proporcionada también por SIGTIERRAS a escala 1:25000. Para asignar el número primo fue necesario contrastar el uso y cobertura del suelo de la cuenca del Chota con el uso de suelo que categorizó el SCS de los Estados Unidos, la tabla del anexo 6 resume lo mencionado en éste párrafo.

Las tres variables utilizadas para determinar el Número de Curva (CN) fue transformado a formato raster, con este último insumo y mediante la herramienta raster calculator se procedió a realizar la multiplicación. A los resultados obtenidos de la multiplicación de las capas reclasificadas según su número primo designado, se procedió a eliminar todos los polígonos menores de 0.5 km<sup>2</sup> con ayuda de la herramienta Elimitate de ArcGIS; a continuación se ubicó el valor de la curva CN correspondiente. En la tabla del anexo 7 se resume lo descrito anteriormente.

Debido a que los NC publicados fueron calculados para condiciones antecedentes normales (II). En la presente investigación fue necesario calcular CN a condiciones de humedad tres (III) mediante la siguiente relación:

$$(NRSC, 2004) \quad CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0.13 CN(II)} \quad (7)$$

Una vez determinado la CN para cada polígono se procedió al cálculo de la lluvia neta o escorrentía y su respectivo coeficiente. Los resultados se pueden visualizar en la figura 5:

### **3.5.3. Pendiente**

Los datos topográficos se obtuvieron de un Modelo Digital de Elevación (DEM) del sistema Alos Palsar del Alaska Satellite Facility, el cual facilitó información detallada con una resolución espacial de 12.5m.

Para el ángulo de la pendiente de cada célula se calculó con la Herramienta de análisis espacial en el entorno ArcGIS versión 10.2.

#### **3.5.4. Tipo de suelo**

Para la obtención de esta variable se solicitó mediante oficio personal al Director Ejecutivo del Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), información referente a geopedología de suelos de la cuenca del río Chota, mismos que facilitaron lo solicitado en formato shapefile a una escala 1 : 25 000. En la presente investigación se hará hincapié en los polígonos que contiene los datos de textura y profundidad del suelo, debido que son variables que inciden al momento de tomar decisiones respecto a que técnica de conservación de suelo y agua se aplicará en una localidad específica.

#### **3.5.5. Uso y cobertura de la tierra.**

Con la finalidad de obtener ésta variable, se solicitó mediante oficio personal al Director Ejecutivo del Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), información referente a sistemas productivos de la cuenca del río Chota, mismos que facilitaron lo solicitado en formato shapefile a una escala 1 : 25 000

### **3.6. Mapas de criterios**

Para proceder a generar mapas de criterio se utilizó la cartografía de precipitación, escorrentía, pendiente, uso y cobertura de la tierra y suelo (clases, textura y profundidad de los suelos). Los cuales con ayuda del software ArcGIS 10.2 de ESRI se reclasificaron mediante la extensión de Spatial Analyst lo que permitió categorizar de manera homogénea las propiedades de cada factor ambiental (criterios).

En la elaboración de los mapas de criterio (factores ambientales que intervienen en la decisión de aplicar TCSA según la FAO), fue necesario determinar los niveles de idoneidad más adecuados para aplicar TCSA de la: precipitación, coeficiente de escorrentía, pendiente del terreno, profundidad y textura del suelo, uso y cobertura del suelo. Cada criterio presentado en la tabla 15

fue clasificada de acuerdo a sus condiciones de frontera derivadas de la revisión de literatura (Critchley & Siegert, 1991; Hudson, 1987; Kahinda et al, 2008; Mbilinyi et al, 2007; Oweis et al, 1999; Tumbo, Mbilinyi, Mahoo, & Mkiramwinyi, 2006).

La Puntuación de idoneidad para cada factor ambiental se expresó en un valor numérico o puntaje idóneo en una escala del 1 al 9 (con el fin de categorizarlos según la escala de Saaty). Este enfoque de puntuación de niveles de aptitud, permitió estandarizar condiciones de las variables que caracterizan a la cuenca en estudio; lo que más adelante permitió identificar sitios idóneos para la aplicación de técnicas de conservación de suelo y agua en la cuenca del río Chota.

### **3.7. Aplicación del Método de Análisis Multicriterio (MAM) en la investigación**

El Método de Análisis Multicriterio, fue diseñado por el matemático Thomas Saaty en la década de los 70, para resolver el tratado de reducción de armamento estratégico entre los Estados Unidos y la antigua URSS.

El MAM mediante la construcción del modelo jerárquico facultó de una manera eficiente y gráfica, organizar la información respecto del problema de decisión, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar. En otras palabras; permitió desmenuzar el problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión. Este proceso se fundamentó en varias etapas que se desarrolla a continuación.

#### **3.7.1. Modelización del problema**

En ésta etapa se identificó y estructuró los elementos del problema de acuerdo a su jerarquía. Empezamos determinando el objetivo principal, teniendo en consideración que las metas determinadas deben representar las necesidades e intereses generales de la unidad de decisión. En esta investigación el objetivo fue perfectamente identificado: Desarrollar un modelo para la selección de técnicas de conservación de suelo y agua en la Cuenca del Río Chota, al norte de Ecuador.

El siguiente paso fue identificar los criterios que influyen significativamente en el cumplimiento del objetivo planteado; para la presente investigación se consideró cinco criterios como elementos naturales que intervienen al momento de tomar la decisión de que técnica de conservación de suelo se aplicará en una determinada superficie de terreno, siendo estos: la precipitación, escorrentía, pendiente, el uso y cobertura de la tierra, suelo (textura y profundidad del suelo).

La tarea siguiente consistió en identificar las alternativas. Corresponde a propuestas factibles mediante las cuales se podrá alcanzar el objetivo principal; en la investigación se propone dos técnicas de conservación de suelo como alternativas, siendo las Terrazas de Formación Lenta (TFL) y Zanjas de Infiltración (ZI).

Con estos elementos se pudo graficar el modelo jerárquico de objetivos, criterios (variables) y alternativas para la investigación planteada como indica la figura 3.

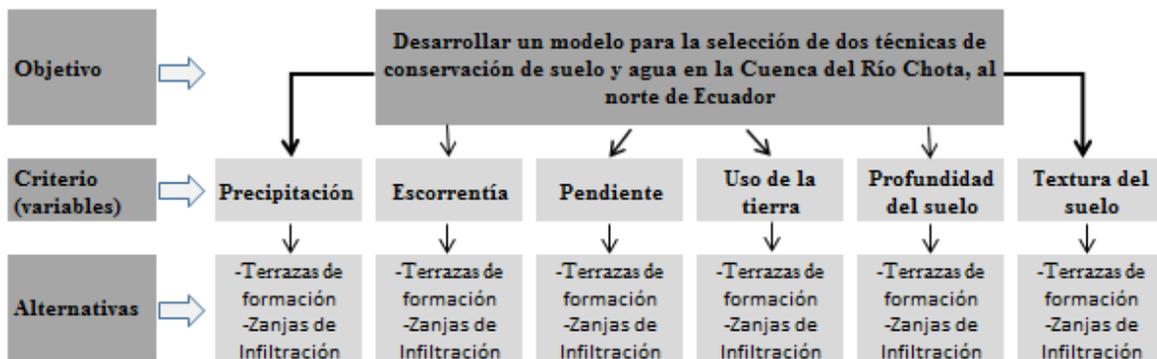


Figura 3. Modelo jerárquico de objetivos, criterios y alternativas para la investigación planteada

### 3.7.2. Evaluación y priorización de alternativas y criterios

Para determinar la priorización de los criterios y alternativas se consideró lo siguiente:

- Que la evaluación se realiza por medio de comparaciones binarias frente a un tercer elemento; lo que permite conocer y medir las preferencias del decisor respecto a los diferentes componentes del modelo (criterios, subcriterios, alternativas). Para el presente estudio, se realizó las comparaciones de pares de los elementos del modelo (criterios y

alternativas) mediante la asignación de un valor de la escala de Saaty para cada comparación (tabla 12).

Haciendo uso de la escala propuesta por Saaty, fue indispensable considerar que para determinar la mejor técnica de conservación de suelo aplicable en un lugar específico de la cuenca del río Chota, lo siguiente:

- Cada posición o celda de la matriz corresponde a uno de los valores de la escala de Saaty
- Las comparaciones del elemento consigo mismo da un valor de uno.
- Las comparaciones ubicadas al lado izquierdo de las sombreadas tienen una intensidad de preferencia inversa a las ubicadas al lado derecho de las sombreadas (axioma 1 del MAM).

Lo señalado anteriormente se puede verificar en la ilustración siguiente:

Tabla 12  
Matriz para la comparación por pares

<b>CRITERIO</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
<b>C1</b>	<b>C1/C1</b>	C1/C2	C1/C3	C1/C4	C1/C5
<b>C2</b>	C2/C1	<b>C2/C2</b>	C2/C3	C2/C4	C2/C5
<b>C3</b>	C3/C1	C3/C2	<b>C3/C3</b>	C3/C4	C3/C5
<b>C4</b>	C4/C1	C4/C2	C4/C3	<b>C4/C4</b>	C4/C5
<b>C5</b>	C5/C1	C5/C2	C5/C3	C5/C4	<b>C5/C5</b>

Con los valores introducidos en el gráfico anterior, se pudo proceder a determinar la prioridad que tienen cada uno de los criterios y alternativas planteados en esta investigación. Para lo cual se hizo uso de un soporte informático conocido como Expert Choice; es preciso mencionar, que la aplicación de la metodología del MAM a un problema de decisión multicriterio utilizando el Expert Choice suele conocerse en la literatura como MAM/EC.

- b) Una vez comparadas las alternativas respecto a los criterios, se subió un escalón en el modelo jerárquico. El siguiente paso fue comparar los criterios respecto del objetivo principal. De nuevo actúa el investigador, ya que debe plantearse qué criterio es más

importante respecto de la selección de la mejor técnica de conservación de suelo y agua. La respuesta, de nuevo la encontraremos mediante la comparación verbal de cada criterio con los demás, siempre por parejas y respecto del objetivo principal.

### **3.7.3. Síntesis del problema**

Debido que las prioridades están basadas en las emisiones y evaluaciones de juicios, echas a través de las comparaciones de los componentes de los modelos jerárquicos llevado a cabo por el investigador; fue imprescindible determinar la razón de consistencia de la comparación en pares, en función a la siguiente ecuación:

$$(Saaty, 1980) RC = IC/IR \quad (5)$$

Dónde:

$$(Saaty, 1980) IC = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (6)$$

*n = Cantidad de elementos que se esta comparando, para este caso son cinco*

*IR = Indice de consistencia de una matriz en pares generadas de manera aleatorea*

Es preciso mencionar que una razón de consistencia mayor de 10% (índice  $\leq 0.1$ ) nos indicará inconsistencia en las comparaciones en pares. En tales casos será conveniente ajustar los valores de los juicios (Sipahi & Mehpare, 2010).

### **3.7.4. Escala de evaluación**

Debido que los criterios ambientales en esta investigación tienen su propia unidad medida y para determinar el nivel de idoneidad, es necesario homogenizar o agrupar en rangos a cada uno de los criterios se considerará los valores de la escala planteada por Saaty como se muestra en la tabla 12:

Tabla 13

Expresión numérica de calificación de idoneidad e importancia comparativa

<b>Expresión Numérica</b>	<b>Valoración de idoneidad</b>	<b>Importancia comparativa</b>
1	No adecuado	Igual importancia
3	Ligeramente adecuado	Moderada importancia de uno sobre otro
5	Moderadamente adecuado	Elemento fuertemente favorecido
7	Muy adecuado	Elemento muy fuertemente favorecido
9	Óptimamente adecuado	Extrema importancia
2,4,6,8,	Valores intermedios entre dos juicios	Usado como valores de consenso entre dos juicios
0	No hay relación o restringido	El elemento no contribuye al objetivo

FUENTE: Escala de importancia comparativa (Saaty 1990)

### 3.8. Generación de mapas de idoneidad

Una vez generadas y reclasificadas las variables en formato raster a una escala numérica que representan las cinco alternativas (tabla 13) para todas las variables utilizadas en la presente investigación; además teniendo la ponderación o peso de cada una de las variables ( resultado de la tabla 11 una vez realizado los cálculos correspondientes) con base en los resultados obtenidos y validados del análisis multicriterio se procedió a realizar un algebra de mapas que nos muestre el área de la cuenca del río Chota que cumple con los factores ambientales idóneos para la aplicación de: terrazas de formación o zanjas de infiltración, como técnica de conservación de suelo y agua. El procedimiento de superposición matemáticamente se expresa como:

$$(Krois & Schulte , 2014) \quad SLI_{yj} = \sum PP_{yi} * NI_{yi} \quad (8)$$

Dónde:

*MI<sub>ij</sub>* = mapa de idoneidad para cada técnica de conservación de agua y suelo

*PP* = peso ponderado con el proceso jerárquico de análisis

*NI* = nivel de idoneidad

Para obtener estas coberturas se utilizó la herramienta superposición ponderada (weighted overlay) del software ArcGIS 10.2, la que se encuentra en la caja de herramientas ArcToolbox dentro de la extensión Spatial Analyst Tools. Mencionada herramienta permite realizar

operaciones de coberturas raster, teniendo en cuenta pesos o ponderaciones diferentes para cada una de las coberturas a operar, en este caso en particular los pesos que fueron usados se definieron con anterioridad mediante el cálculo del vector de prioridad dentro del proceso de análisis jerárquico.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Preparación de los datos de entrada y pre-procesamiento

##### 4.1.1. Precipitación

Los datos meteorológicos utilizados en este estudio se resumen en la tabla 14, las precipitaciones medias anuales dentro de la cuenca varía entre 448 mm y 1218 mm dependiendo de la localidad (de acuerdo a las estaciones). Entre el 71% y el 84% se produce durante la temporada lluviosa (octubre – abril).

Tabla 14

Precipitación media anual y estacional, precipitación máxima diaria con un periodo de retorno de un año al 10% de probabilidad

Estación	Altitud (m.s.n.m)	PRECIPITACIONES (en mm)		
		Media anual	Media estacional	Máximas Diarias, Periodo de retorno de un año con probabilidad del 10%
Ambuqui	1880	448	376	27.61
El Ángel	3000	944	865	62.33
Julio Andrade	2890	1154	933	44.53
Mariano Acosta	2980	1218	954	48.74
Pimampiro	2090	558	448	30.37
San Francisco de Sigsipamba	2230	1058	749	34.67
San Gabriel	2860	1000	804	37.64

La cantidad de precipitación máxima diaria, en un periodo de retorno de un año al 10% de probabilidad varía entre 27.61 mm y 62.33 mm dependiendo de la localiaada en la que se encuentran las estaciones meteorológicas.

Con la inforcción resumida en la tabla anterior, se procedió a determinar la realción existente entre la altitud y la media estacional al igual que entre la altitud y la maxima diaria a un periodo de retorno de un año y una probabilidad del 10% que se repita el evento. Las dos variables aumentan respetando una ecuación polinómica de segundo orden; el coeficiente de determinación es más alto para la media estacional ( $r^2 = 0.90$ ), mientras que para los datos diarios su coeficiente de determinación fue de 0.76.

La relación existente entre la altitud y la media estacional, constituyó la base para elaborar el mapa de cobertura espacial de las precipitaciones (isoyetas) que permite cuantificar la precipitación anual dentro de la cuenca. Mientras que la relación de la altitud y la maxima diaria a un periodo de retorno de un año y una probabilidad del 10% que se repita el evento, fueron los insumo utilizados como precipitaciones (poligono de Thiessen) para el cálculo del coeficiente de escorrentía de la cuenca mediante en el Método del Número de Curva; desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (insumo utilizado en la formula 3).

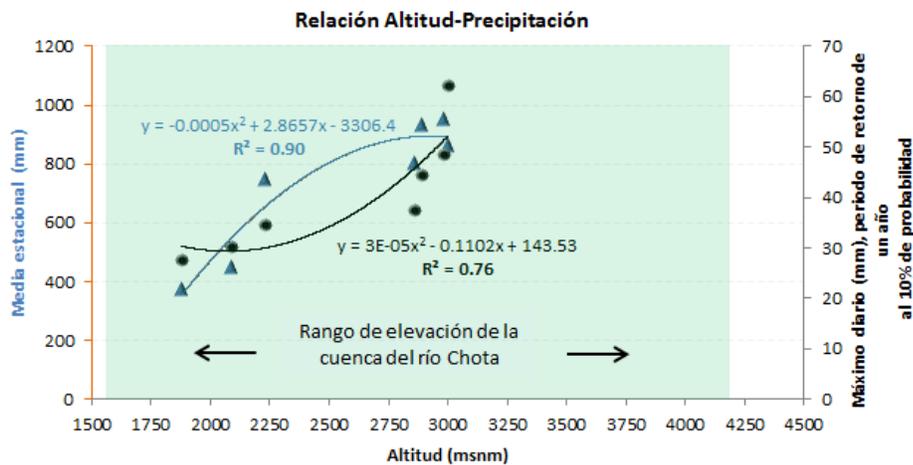


Figura 4. Relación altitud precipitación, de la media estacional y la máxima diaria a un periodo de retorno de un año con un 10% de probabilidad

#### 4.1.2. Escorrentía

La figura 5, recopila la escorrentía directa en  $m^3/s$ ; determinado según la metodología desarrollada en el presente estudio, la suma de la escorrentía generada por la cuenca del río Chota es de  $34.09 m^3/s$ . Resultado que al contrastar con los valores promedios registrados por el INAMHI (estación hidrológica Puente en Chota Carretera, código H015) y publicados en los anuarios hidrológicos desde 1990 hasta el 2016 en promedio reportan  $33.57m^3/s$  (el valor del error típico de los registros de datos es de 0.006 lo que permite inferir que la media del coeficiente de escorrentía aforado es representativa del conjunto de datos).

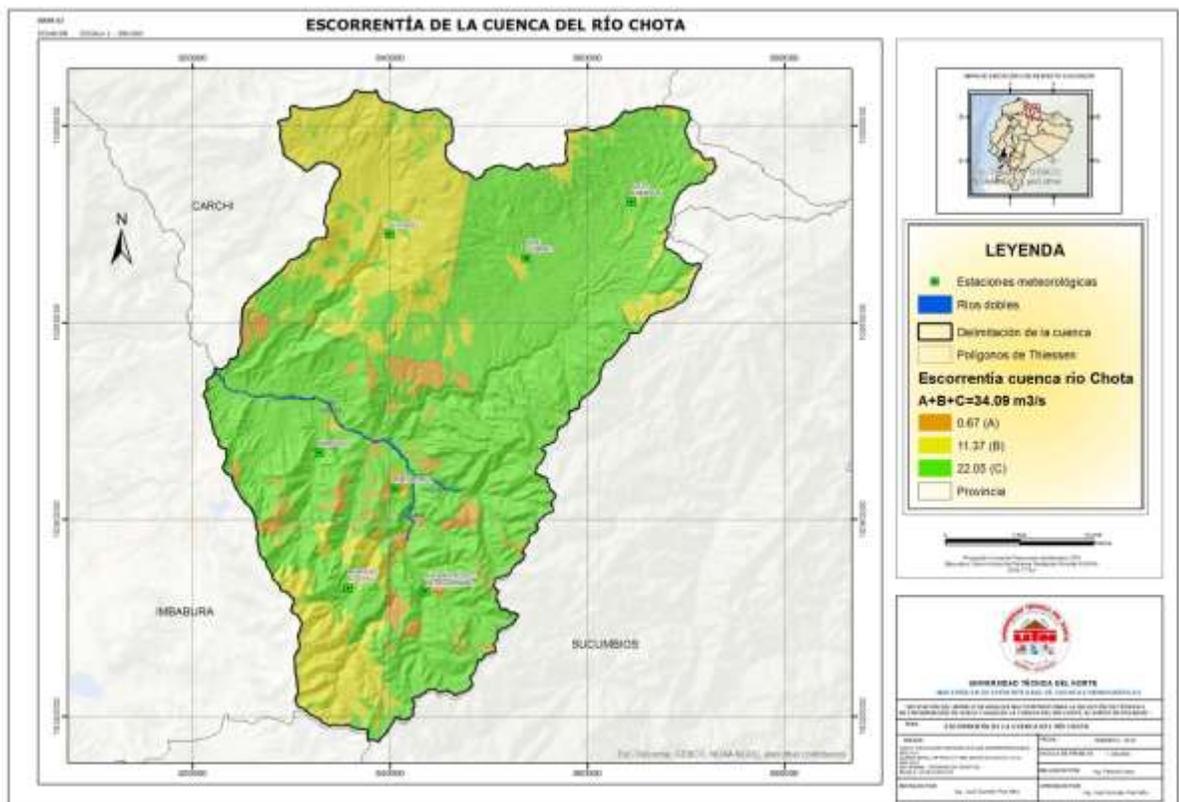


Figura 5. Escorrentía de la cuenca del río Chota

Para determinar el coeficiente de escorrentía se relacionó entre la parte de la precipitación que circula superficialmente (Q) y la precipitación total anual (P), entendiendo que la parte superficial

es menor que la precipitación total al descontar la evaporación, evapotranspiración, almacenamiento, etc.

$$(NRSC, 2004) C = \frac{Q(mm)}{P(mm)} \tag{9}$$

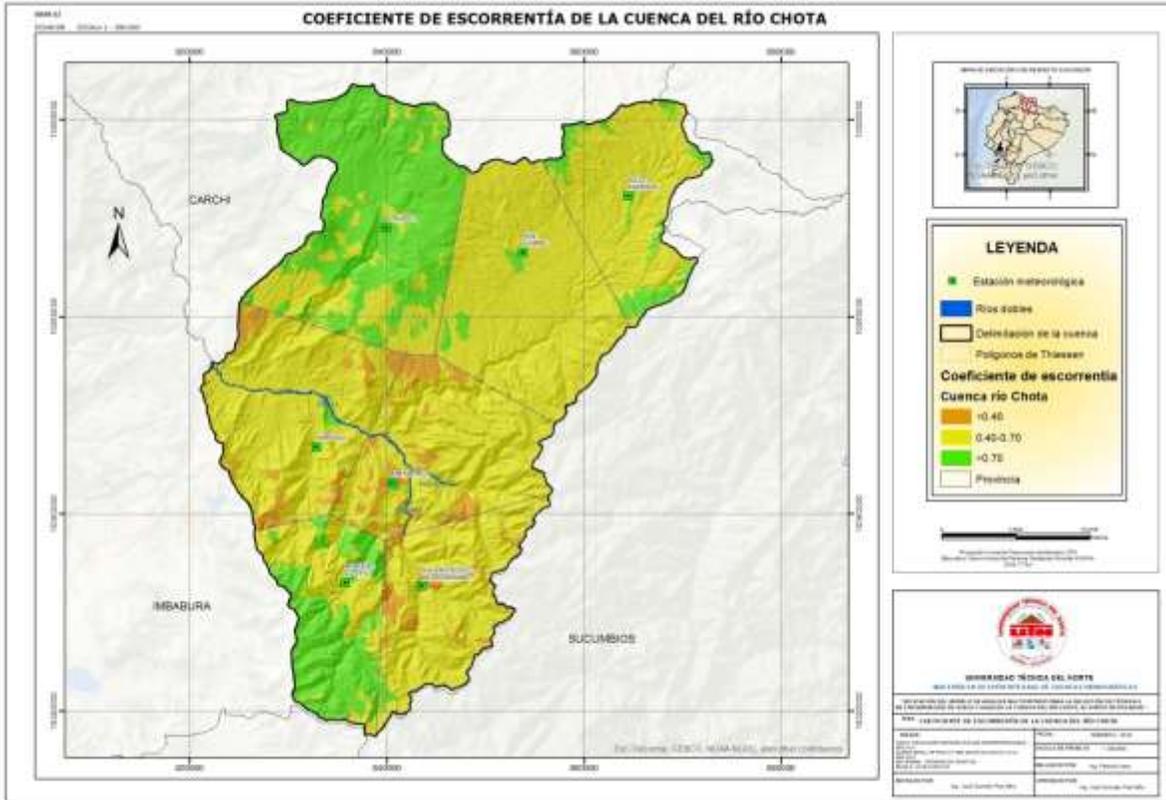


Figura 6. Coeficiente de escorrentía de la cuenca del río Chota

La figura 6, gráficamente representa los coeficientes de escorrentía distribuidos para la cuenca del río Chota de acuerdo al modelo desarrollado en la investigación. El 71% de la superficie de la cuenca en estudio denota un coeficiente de escurrimiento comprendido entre 0.4 y 0.7; mientras que el 24% de la cuenca se encuentra influenciado por un coeficiente de escorrentía superior al 0.7 y apenas 5% del área de la cuenca tiene un coeficiente menor al 0.4. En promedio la cuenca cuenta con un coeficiente promedio de escorrentía ponderada de 0.62% lo que comparado con el 0.64% considerado según el estudio hidrológico del río mira 2005 existe una variación de 3%.

### 4.1.3. Pendiente

El procesamiento del DEM del sistema Alos Palsar de Alaska Satellite Facility muestra una variada escala que permitió realizar la caracterización de la cuenca del río Chota desde el factor ambiental topográfico (pendiente). Factor que para su respectivo análisis fue expresado en grados ( $^{\circ}$ ), clasificada y categorizada de acuerdo al manual para el usuario de SIGTIERRAS. El 31.49% de la superficie de la cuenca se encuentra predominada por una pendiente de  $10^{\circ}$  a  $20^{\circ}$ , el 27.44% del área de la unidad hidrográfica analizada está influenciada por una inclinación comprendida entre los  $5^{\circ}$  a los  $10^{\circ}$  y el 18.72% de la superficie de la cuenca tiene una pendiente de  $0^{\circ}$  a  $5^{\circ}$  de inclinación.

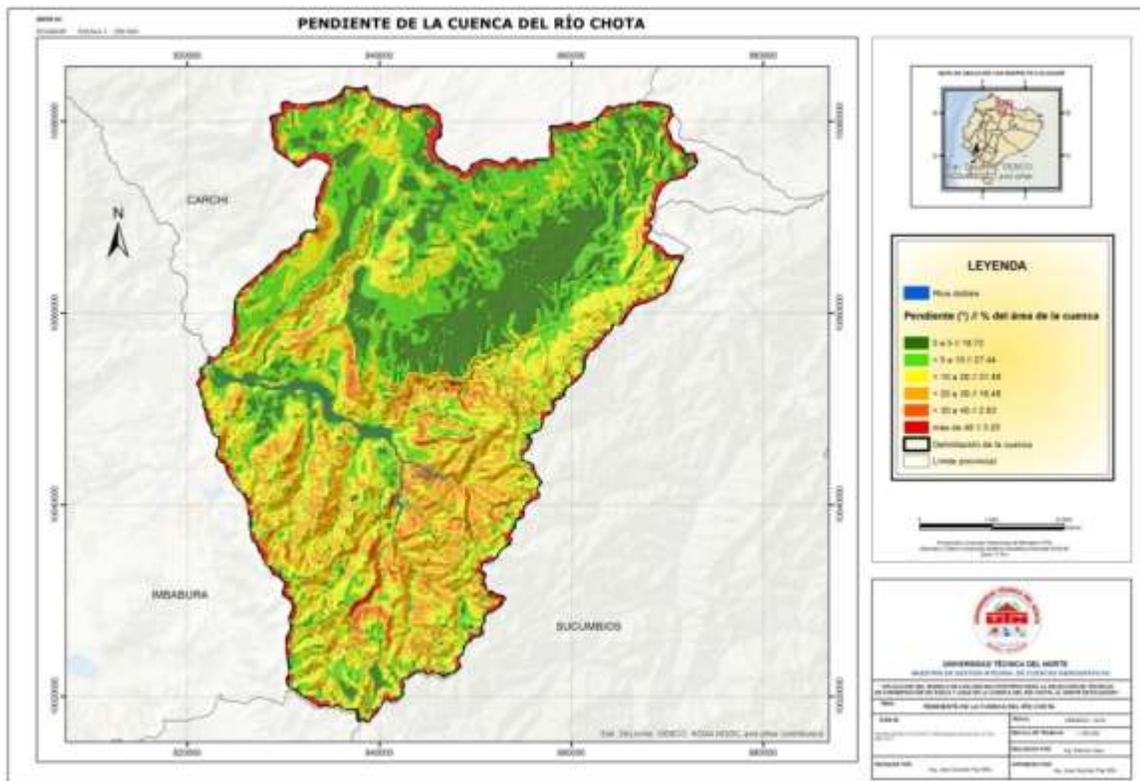


Figura 7. Pendiente del terreno de la cuenca del río Chota

### 4.1.4. Uso del suelo

Para procesar ésta variable, se utilizó la cartografía de geopedología a escala 1:25000 generada por el programa SIGTIERRAS ejecutada por el MAG; el campo utilizado fue el denominado nivel

2. Como se puede visualizar en la figura 8 se establecieron nueve categorías en la cuenca del río Chota, los usos y coberturas del suelo con mayor representatividad respecto a la superficie de la cuenca figuraron: pastizales con una superficie que representa el 27.61% del total de la cuenca, seguido de suelo destinado a la agricultura (20.11%) distribuidos en cultivos tales como papa, fréjol, maíz, arveja etc. y vegetación arbustiva con 18.21%, en cuarto lugar se ubicó el uso y cobertura del suelo categorizado como páramo con una representatividad del 16.46% de la cuenca. Para los dos primeros casos la superficie se encuentra en su totalidad distribuida en la cuenca media y el páramo se distribuye totalmente en la cuenca alta del río Chota.

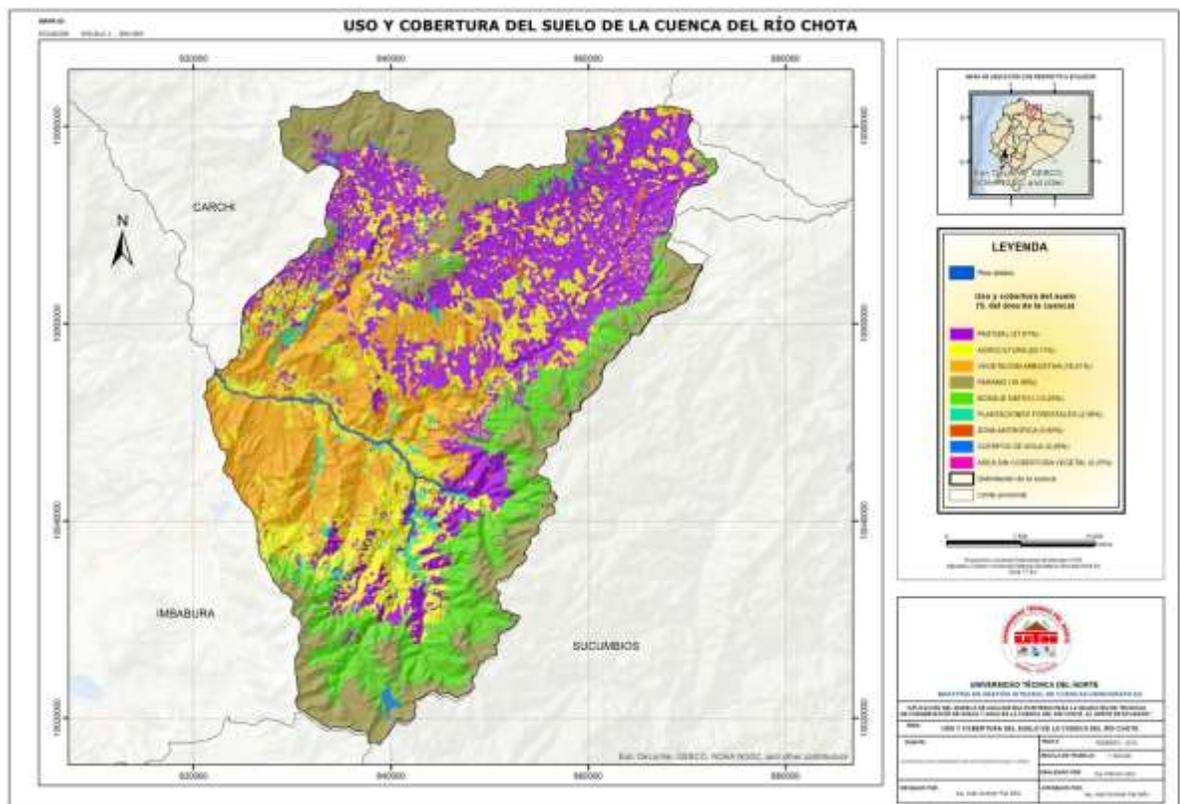


Figura 8. Uso y Cobertura del suelo de la cuenca del río Chota

#### **4.1.5. Suelos**

##### **4.1.5.1. Orden de los suelos de la cuenca**

Para clasificar por órdenes el suelo que conforma la cuenca del río Chota, se utilizó la información cartográfica de geopedología a escala 1:25000, generada por el programa SIGTIERRAS ejecutado por el MAG.

Según la nomenclatura de la Base Mundial de Referencia para la Clasificación de Suelos (FAO, 2006), la cuenca del río Chota está constituida de seis ordenes de suelo: Andisols, Mollisols, Entisols, Inceptisols, Aridisols e Histosols; además, una mínima superficie (5.24%) está representada por tierras misceláneas y otras que no aplican (cuerpos de agua, glaciares, afloramientos rocosos, etc.). Como se puede observar en la figura 9, los suelos con mayor representatividad en relación a la superficie de la cuenca en estudio son: Andisols, Mollisols y Entisols con una participación del 41,16%, 33.14% y 11.85% del área total de la cuenca respectivamente.



conservación y así evitar la pérdida del suelo agrícola. Una gran parte de la superficie de la cuenca (19.10%), tiene suelos profundos (más de 1.00 de profundidad), mismos que para Ibáñez (2007), son los adecuados para la agricultura, puesto que retienen humedad y permiten desarrollar el sistema radicular de las plantas.

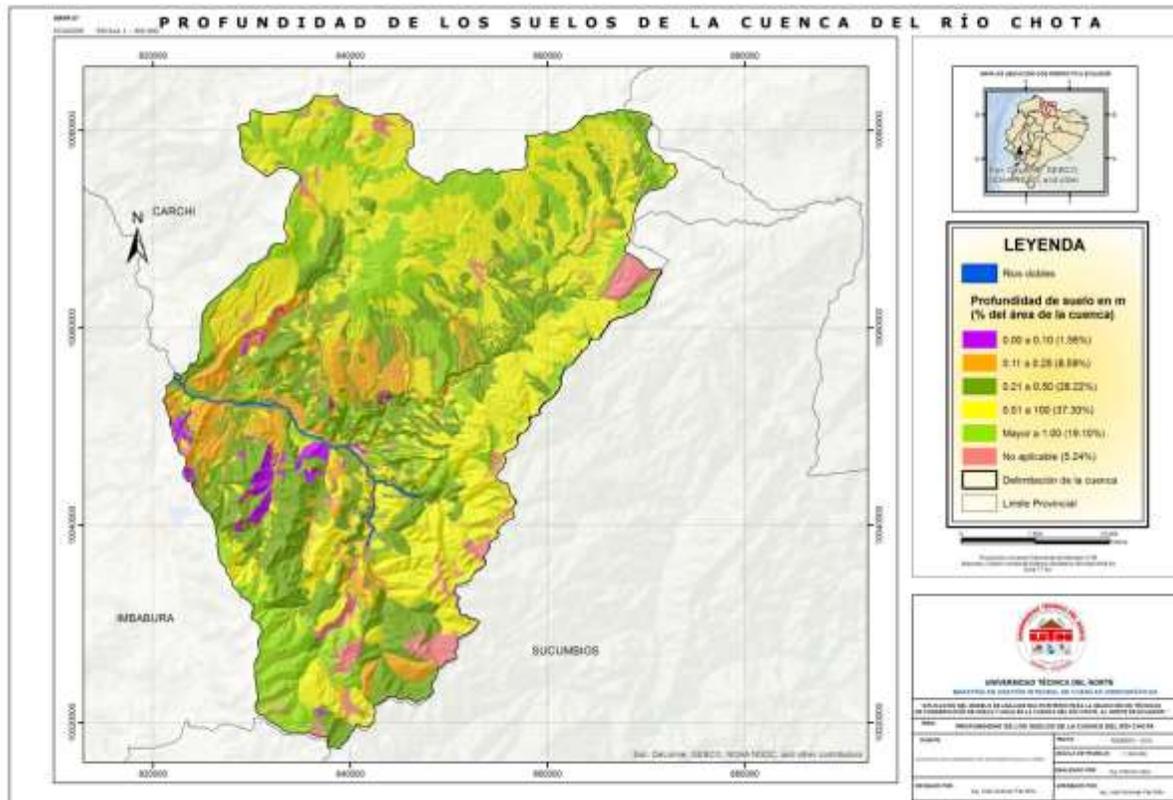


Figura 10. Profundidad de los suelos en la cuenca del río Chota

#### 4.1.5.3. Textura de los suelos de la cuenca

Para la caracterización de la cuenca del río Chota, desde el enfoque de la textura de los suelos; se utilizó la cartografía de geopedología a escala 1:25000, generada por el programa SIGTIERRAS ejecutado por el MAG.

La clase textural predominante en la cuenca del río Chota es Franco (36.60% de la superficie de la cuenca); Raudes & Sagastume (2009), considera que son suelos con elevada productividad agrícola, puesto que las combinaciones de arena, limo y arcilla son las ideales para incrementar la capacidad de intercambio catiónico; además Ibáñez (2007), manifiesta que suelos con esta textura son capaces de retener 280 litros por m<sup>3</sup> de agua (28 % en volumen), de los cuales 190 son de agua disponible. La clase textural Franco-arenoso representa el 24.86% de la cuenca, su principal característica es su baja retención de humedad por lo que Alegre & Rao (1996), considera de importancia realizar técnicas de conservación de agua in situ en suelos denominados franco-arenosos. El 21,79% del área de la cuenca cuenta con suelos de clase textural denominados Franco-arcillosos; Critchley et.al (1991) consideran que este tipo de textura son impermeables, en condiciones de humedad son difíciles de trabajar, en ellos las lluvias finas y duraderas aportan más agua al suelo que las intensas y rápidas; son los suelos que retienen mayor cantidad de agua y aunque una gran parte de ella es retenida con mucha fuerza y no está disponible para las plantas, presentan una gran cantidad de agua disponible o agua útil. Lo descrito con anterioridad se puede visualizar en la figura 11.

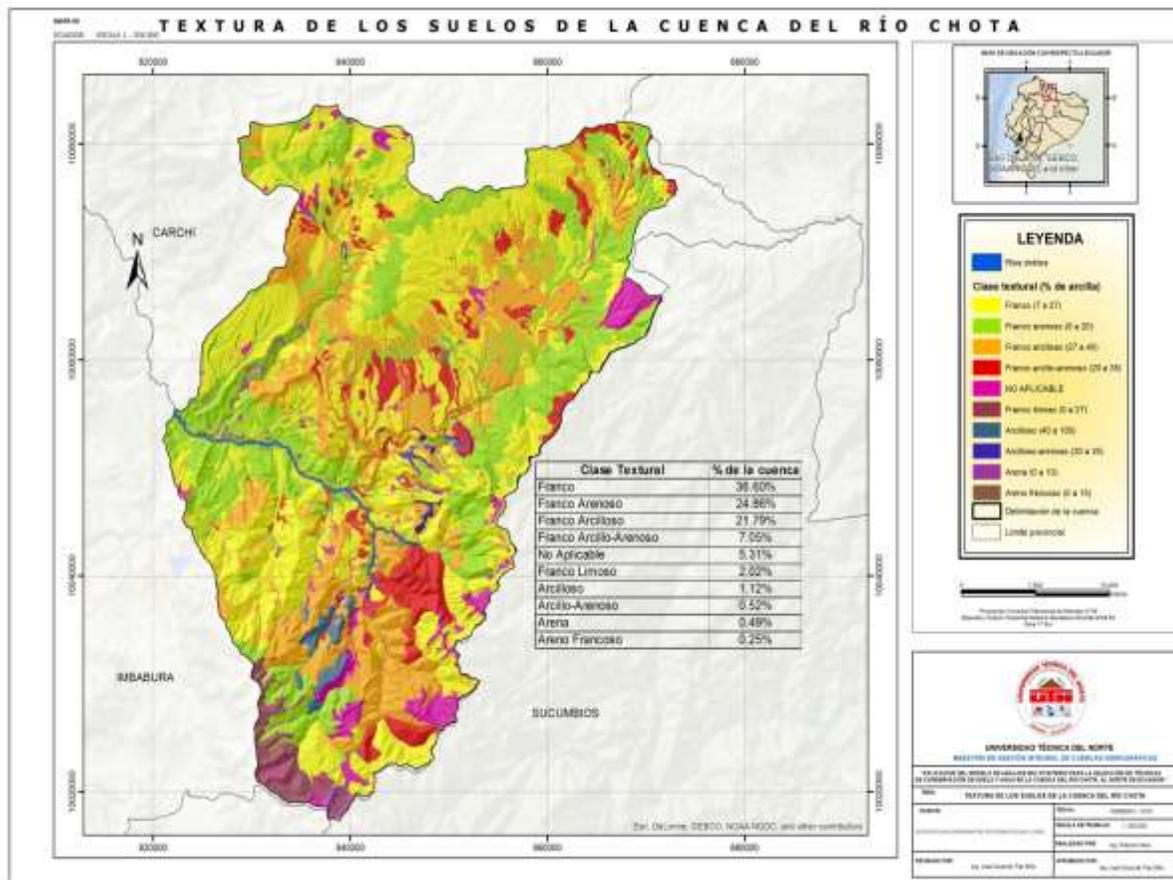


Figura 11. Textura de los suelos en la cuenca del río Chota

### 4.3. Mapas de criterios

Cabe mencionar que los niveles de idoneidad tanto para las terrazas de formación y las zanjas de infiltración son iguales a excepto del valor o nivel de la pendiente. Las zanjas de infiltración son más apropiadas en pendientes moderadas (0° a 5° de inclinación), mientras que las terrazas de formación son mejor adecuadas en pendientes pronunciadas (30° a 40°).

Tabla 15

Niveles de idoneidad de factores ambientales para aplicar TCSA (terrazas de formación y zanjas de infiltración)

Nivel de idoneidad	Óptimamente adecuado	Muy adecuado	Moderadamente adecuado	Ligeramente adecuado	No adecuado	No hay relación o restringido
	9	7	5	3	1	0
Precipitación (mm)	400-600	200-400 600-800	800-1000	100-200 1000-1200	0-100 >1200	
Coefficiente de escorrentía	>0.9	0.6-0.9	0.4-0.6	0.0-0.39		
Pendiente (°)-terrazas	30-40	20.0 - 30.0	10.0-20.0	5.0-10.0	0-5	más de 40
Pendiente (°)-Zanjas	0.0-5.0	5.0-10.0	10.0-20.0	20.0 -30.0	30.0 - 40.0	más de 40
Profundidad del suelo (m)	>1.0	0.51-1.0	0.21 -0.50	0.11 - 0.20	0.0 - 0.10	
Textura del suelo (clases texturales clasificadas según el contenido de arcilla)	Francos, Franco-Arcillo-Arenoso, Franco-Arcillo-	Areno-Francoso, Franco-Arenoso, Franco-Limoso	Arcillo-Arenoso, Franco-Arcilloso	Arena	Arcilloso	No aplicable
Uso de suelo	Agricultura y paltizales	Páramos y vegetación arbustiva.	Plantaciones forestales	Zona antrópica	Bosque nativo	Cuerpos de agua

En la figura 12, se visualiza los mapas de cada criterio ambiental de la cuenca del río Chota, categorizados de acuerdo a los niveles de idoneidad para aplicar técnicas de conservación de suelo y agua (terrazas de formación y zanjas de infiltración).

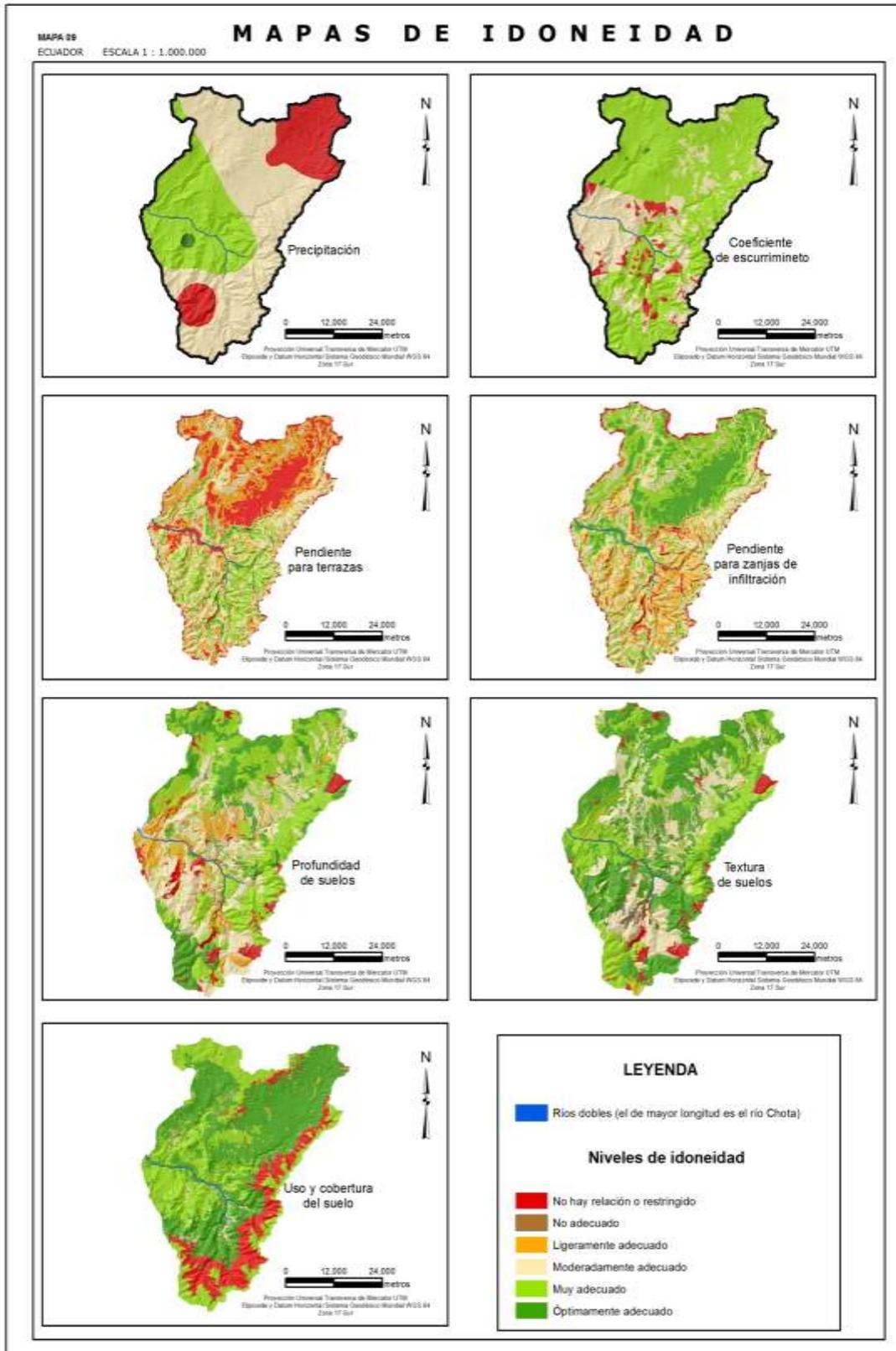


Figura 12. Niveles idóneos de factores ambientales en la cuenca del río Chota

#### 4.4. Análisis Multicriterio

En la tabla 16 se verifica las prioridades de cada uno de los factores ambientales de la unidad hídrica. El criterio más importante, para decidir la mejor técnica de conservación de suelo y agua en una determinada superficie de la cuenca es la pendiente del terreno o topografía (45%), seguida por las propiedades del suelo (textura y profundidad del suelo) 23%, en tercer lugar se encuentra el uso y cobertura de la tierra con el 20%, hidrología (coeficiente de escorrentía) con el 8% y la precipitación con el 3%.

Tabla 16  
Matriz de comparación pareada de los criterios o factores ambientales de la cuenca del río Chota.

Matriz de comparación pareada							
Criterios	Precipitación	Coeficiente de escorrentía	Pendiente del terreno	Uso de suelo	Textura del suelo	Profundidad del suelo	Prioridades
Precipitación	1	1/3	1/7	1/9	1/5	1/3	0.03
Coeficiente de escorrentía	3	1	1/7	1/5	1	1	0.08
Pendiente del terreno	5	7	1	3	5	5	0.45
Uso de suelo	9	5	1/3	1	1	1	0.20
Textura del suelo	5	1	1/5	1	1	1	0.12
Profundidad del suelo	3	1	1/5	1	1	1	0.11

Una consideración importante para determinar la calidad de la decisión final, se refiere a la consistencia de los juicios que muestra el tomador de decisiones (investigador) en el transcurso de la serie de comparaciones pareadas; Saaty (1977), propuso la Razón de Consistencia (RC) basado en la solución por vectores propios al problema y para aceptar una matriz como consistente la RC deberá ser  $\leq 0,1$ . Debido a que en la presente investigación la RC fue de 0.09 se considera que los juicios razonados en las matrices pareadas son lógicas.

Para determinar los sitios idóneos para la aplicación de Técnicas de Conservación de Suelo y Agua en la cuenca del río Chota se calculó mediante la ecuación (8). Por lo que el nivel de idoneidad para cada TCSA en particular y el peso, ponderación o prioridad se combina; este procedimiento conocido como el proceso de superposición ponderada se traduce en un nivel de

idoneidad. En la figura 13 se visualiza las superficies idóneas para construir zanjas de infiltración y terrazas de formación en la cuenca en estudio.

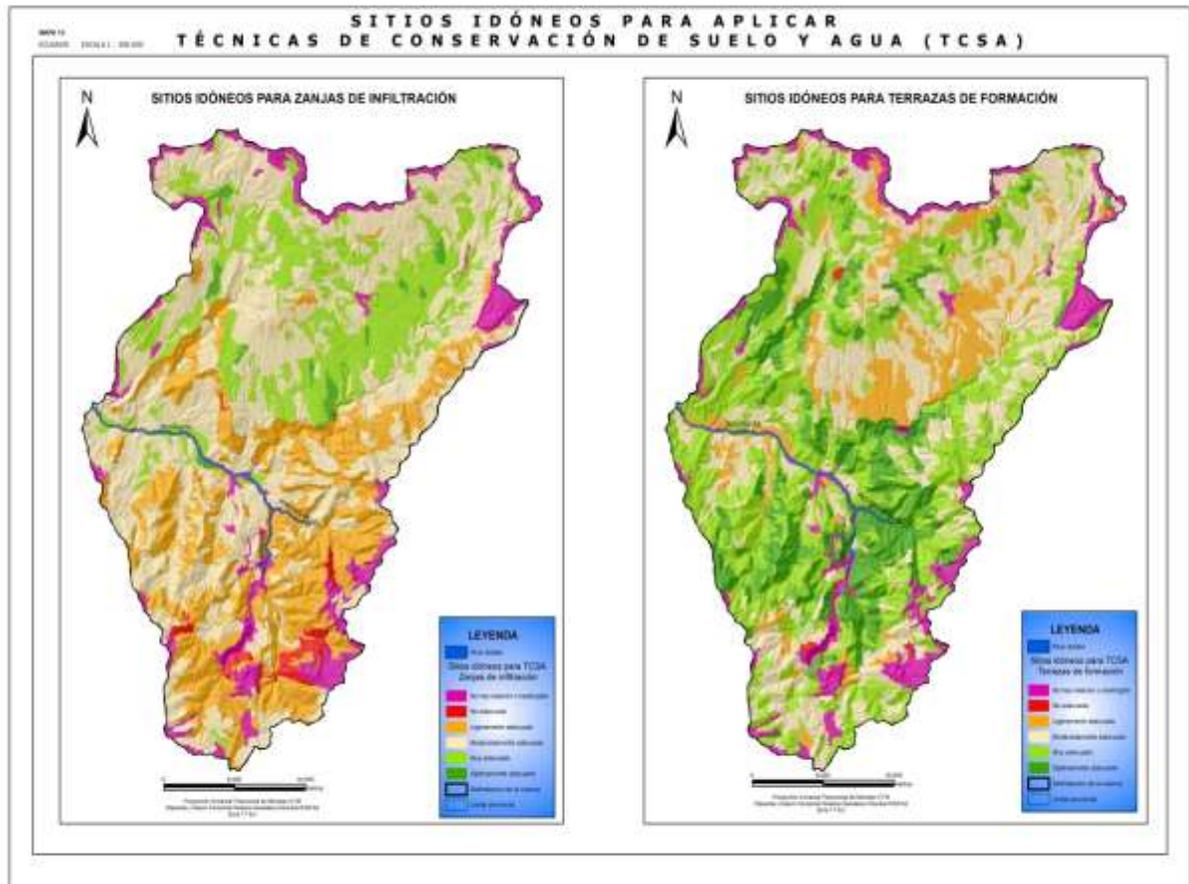


Figura 13. Mapas de idoneidad para aplicar TCSA (zanjas de infiltración y terrazas de formación)

El análisis indica que para construir terrazas de formación en la cuenca del río Chota, considerando los factores ambientales; existen 281 km<sup>2</sup> con condiciones óptimas y 700 km<sup>2</sup> con condiciones muy adecuadas, lo que representa un 14,75% y 36,72% de la superficie total de la unidad hídrica. Alternativa que se encuentra influenciada directamente por la pendiente de la cuenca, para estos dos niveles de idoneidad la pendiente osciló entre los 20° y 40°. A mayor detalle en la tabla 17 se resume las superficies que se pueden aplicar TCSA sean estas terrazas de formación o zanjas de infiltración.

Tabla 17  
Superficie de la cuenca clasificada de acuerdo a los niveles de idoneidad

Nivel de idoneidad	Terrazas de formación		Zanjas de infiltración	
	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%
Óptimamente adecuado	281.37	14.75	22.78	1.19
Muy adecuado	700.41	36.72	354.47	18.58
Moderadamente adecuado	582.94	30.56	879.77	46.12
Ligeramente adecuado	190.78	10.00	473.73	24.84
No adecuado	3.78	0.20	26.48	1.39
No hay relación o restringido	148.2	7.77	150.24	7.88

En cambio, para aplicar zanjas de infiltración como alternativa de conservación de suelo y agua en la cuenca; existen apenas 23 km<sup>2</sup> con niveles óptimos para su construcción y 354 km<sup>2</sup> que prestan condiciones muy adecuadas para realizar mencionada técnica de conservación, lo que representa el 1.19% y 18.58% de la superficie total de la cuenca. Cabe mencionar que la mayor parte de la cuenca (46.12%) presta condiciones moderadamente adecuadas para construir zanjas de infiltración.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- En la cuenca del río Chota se diferencian dos temporadas climáticas, la época seca y época lluviosa con sus respectivos periodos de transición. La primera se presenta entre los meses de octubre a mayo y la segunda de junio a septiembre. En esta cuenca se observa claramente una distribución bimodal de las precipitaciones con dos picos máximos en abril y noviembre y un mínimo en agosto.
- El regimen hídrico de la cuenca se encuentra influenciado por las precipitaciones de la misma y el coeficiente de escurrimiento depende principalmente del uso y la cobertura del suelo, los destinados a la agricultura generan los mayores coeficientes de escurrimiento mismos que son los más propensos a erosión hídrica.
- En la unidad hídrica prevalecen suelos que eliminan de forma fácil el agua de lluvia con textura de media a fina y moderadamente profundos, taxonómicamente son los Andisols los más representativos; además, en la cuenca predominan las pendientes muy fuertes. Características óptimas que promueven la pérdida de suelo, por lo que se urge realizar obras de conservación de suelo y agua sobre todo en suelos con fines agrícolas, ganaderos y forestales.
- Del Análisis Multicriterio se concluye que, la pendiente del terreno es el factor ambiental de la cuenca que predomina al momento de decidir que técnica de conservación de suelo y agua es la más idónea en una determinada superficie de la cuenca en estudio.
- De los mapas de idoneidad generados se puede concluir que para construir terrazas de formación en la cuenca del río Chota, considerando los factores ambientales; existen 281

km<sup>2</sup> en condiciones óptimas y 700 km<sup>2</sup> con condiciones muy adecuadas. En cambio, para aplicar zanjas de infiltración como alternativa de conservación de suelo y agua en la cuenca; existen apenas 23 km<sup>2</sup> con niveles óptimos para su construcción y 354 km<sup>2</sup> que prestan condiciones muy adecuadas para realizar mencionada técnica de conservación; pero la mayor parte de la cuenca (46.12%) presta condiciones moderadamente adecuadas para construir zanjas de infiltración.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Replicar la metodología planteada en la presente investigación en otras cuencas hidrográficas de país, lo que permitirá contrastar los resultados.
  
- ✓ Utilizar la información procesada y analizada en éste documento, en especial cuando se implique realizar Técnicas de Conservación de Suelo y Agua en la cuenca del río Chota.
  
- ✓ Aplicar la metodología planteada en la presente investigación, para el desarrollo de proyectos de inversión pública o privada en el ámbito de conservación de agua y suelo.
  
- ✓ Socializar las investigaciones realizadas en el instituto de posgrado, especialmente las relacionadas a Técnicas de Conservación de Suelo y Agua en instituciones públicas y privadas. Y así, difundir la ciencia generada desde la academia, lo que contribuirá al desarrollo social, ambiental y económico del país.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ferrér, M., Rodríguez, J., & Estrela, T. (2005). GENERACIÓN AUTOMÁTICA DEL NÚMERO DE CURVA CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.
- Agarwal, R., Garg, P., & Garg, R. (2013). Remote sensing and GIS based approach for identification of artificial recharge sites. *Water Resources Management*, 1-19.
- Alegre, J., & Rao, M. (1996). Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 57(1), 17-25.
- Al-Jarrah, M., & Hasan, M. (2011). *Hils setup of dynamic flight path planning in 3D environment with flexible mission planning using Ground Station*. New York, EEUU: Journal of the Franklin Institute.
- Al-Seekh, S., & Mohammad, A. (2009). The effect of water harvesting techniques on runoff, sedimentation, and soil properties. *Environmental Management*, 44(1), 37-45.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitución de la República*. Ecuador.
- Beinat E, & Nijkamp P. (1988). Multicriteria evaluation in land-use management: methodologies and cases studies.
- Berteska, T., & Ruzgiene, B. (2013). *Photogrammetric mapping based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery*. EEUU: Geodesy and Cartography.
- Bruins, H., Enenari, M., & Nessler, U. (1986). Rainwater-harvesting agriculture for food production in arid zones: the challenge of the African famine. *Applied Geography*.
- Calderón, M. (2015). *Reporte Nacional de lucha contra la desertificación*. MAE-PNUD. Quito: Ecuador.
- Carrillo, A., & Villalobos, R. (2011). *Análisis comparativo de los índices de calidad del agua (ica) de los ríos tecolutla y cazones en el periodo marzo-diciembre 2010*. Poza Rica - Tuxpam: Universidad Veracruzana.
- Carver, S. (1991). Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 5(3), 321-339.
- Cerro-Giner, J. (2007). *Arquitectura Abierta para el Control Autónomo Y Teleoperado de un Mini-Helicoptero*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

- Cléríci, C., & García, F. (2001). Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del río de la Plata. *Revista Agrociencia*, 1-12.
- Coder, P. (2013). *Digitalización automática del Patrimonio Arqueológico a partir de Fotogrametría*. Madrid, España: Cuarta edición.
- Constitución, E. (2014). *Constitución de la República del Ecuador*. Alfaro: SE.
- Corredor Daza, J. G. (2015). *Implementación de modelos de elevación obtenidos mediante topografía convencional y topografía con drones para el diseño geométrico de una vía en rehabilitación sector Tulua- Riofrío*. Bogota-Colombia: Riofrío.
- Critchley, W., & Siegert, K. (1991). Water harvesting: A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production. Rome: FAO.
- Critchley, W., Reij, C., & Willcocks, T. (1994). Indigenous soil and water conservation: a review of the state of knowledge and prospects for building on traditions. *Land Degradation & Development*, 5(4), 293e314.
- De Winnaar, G., Jewitt, G., & Horan, M. (2007). A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(15), 1058-1067.
- Dehn, M. (1995). An evaluation of soil conservation techniques in the Ecuadorian Andes. *Mountain Research and Development*, 175-182.
- Días, M. (2011). *Análisis Fotogramétrico de Imágenes adquiridas por un avión no tripulado*. Madrid, España: Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Dirección General de Aviación Civil. (2015). *Resolución N° 251*. Quito: DAC.
- Dorren, L., & Rey, F. (2004). A review of the effect of terracing on erosion. In C. BoixFayons, & A. Imeson (Eds.), *Briefing papers of the 2nd SCAPE workshop* (pp. 97-108). Cinque Terre, Italy.
- Dyer, R., & Forman, E. (1992). Group decision support with the Analytic Hierarchy Process. In: *Decision Support Systems*. 99-124.
- Eisenbeiss, H. (2011). *Investigation of UAV Systems and flight modes for photogrammetric applications*. EEUU: Photogrammetric Record.
- Eraso, G., & Tello, A. (2006). *¿Cómo calcular sus costos topográficos?* San Juan de Pasto: CESMAG.

- Espejel, A., Romero, J., Barrera, A., Torres, B., & Félix, J. (2015). DETERMINACIÓN DEL USO POTENCIAL AGRÍCOLA MEDIANTE MODELACIÓN. *Ra Ximhai*, 1-21.
- FAO. (15 de enero de 1997). *Zonificación Agro-ecológica*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/W2962S/W2962S00.htm>.: <http://www.fao.org/docrep/W2962S/W2962S00.htm>.
- FAO. (2015). La FAO y los 17 objetivos de desarrollo sostenibles .
- Frederick, C. (2008). Manual Práctico de Conservación de Suelos.
- Garcés, J. (2015). *Aplicación de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica para el modelado de la capacidad de acogida para la localización de viviendas de mediana densidad. Caso de estudio Cuenca del río Guadalajara (Valle del Cauca)*. Valle del Cauca, Colombia: Tesis pregrado Universidad del Valle.
- García, J., & Pérez, M. (2009). *Utilización de imágenes aéreas digitales de pequeño formato para la evaluación de desastres*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Gardner, R., & Gerrard, A. (2003). Runoff and soil erosion on cultivated rainfed terraces in the Middle Hills of Nepal. *Applied Geography*, 23(1), 23-45.
- Gómez, D., & Montealegre, D. (2016). *Guía para la estimación de Costos Topográficos en la Consultoría* . Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Gómez, O. (2009-2010). *Guía metodológica de Planificación Territorial bajo auspicio de la Secretaria Nacional de Planificación Territorial. SENPLADES*. Madrid, España: Universidad de Madrid España.
- Guerra, D. (2017). *La Democratización de los medios de producción el caso compra de la Hacienda La Magdalena*. Ibarra, Ecuador: Tesis Maestría Universidad Técnica del Norte.
- Hammad, A., Haugen, L., & Borresen, T. (2004). Effects of stonewalled terracing techniques on soil-water conservation and wheat production under Mediterranean conditions. *Environmental Management*, 34(5), 701-710.
- Hernández López, D. (2006). *Introducción a la Fotogrametría digital*. Bogota, Colombia: Santilla.
- Hidráulicos, S.-C. S. (1982). Manual de Conservación del Suelo y del Agua. 2a ed. Dirección General de Conservación del Suelo y Agua, Colegio de Postgraduados.
- Hudson, N. (1987). Soil and water conservation in semi-arid areas (Vol. 57). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Ibáñez, J. (2007). Profundidad efectiva y Capacidades de Uso del Suelo. *Consejo Superior de Investigaciones científicas*, 2.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2007). *Mejora de los Sistemas de Cartografía del Territorio Colombiano*. Departamento de la Guajira, Colombia: S.E.
- Kadam, A., Kale, S., Pande, N., Pawar, N., & Sankhua, R. (2012). Identifying potential rainwater harvesting sites of a semi-arid, basaltic region of western India, using SCS-CN method. *Water Resources Management*, 26(9), 2537-2554.
- Kahinda, J., Lillie, E., Taigbenu, A., Taute, M., & Boroto, R. (2008). Developing suitability maps for rainwater harvesting in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(8), 788-799.
- Kahinda, J., Rockström, J., Taigbenu, A., & Dimes, J. (2007). Rainwater harvesting to enhance water productivity of rainfed agriculture in the semi-arid Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(15), 1068-1073.
- Kahinda, J., Rockström, J., Taigbenu, A., & Dimes, J. (2007). Rainwater harvesting to enhance water productivity of rainfed agriculture in the semi-arid Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(15), 1068-1073.
- Kahinda, J., Taigbenu, A., Sejamoholo, B., Lillie, E., & Boroto, R. (2009). A GIS based decision support system for rainwater harvesting (RHADESS). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(13), 767-775.
- Krois, J., & Schulte, A. (2014). GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed, northern Peru; *Applied Geography* 74-100, 12249 .
- Lesschen, J. (2007). Soil and water conservation practices.
- Lorente Palacin, D. (2007). *Representación y edición de un plan de vuelo sobre un modelo digital de elevación en entorno*. Catalonia, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Luna, E., & Lavado, W. (2015). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenca Jetepeque, Perú. *Revista Tecnológica ESPOL- RTE*.
- MAE-MAGAP-IGM. (2013-2014). *Proyecto de Generación del Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra del Ecuador Continental*. Ecuador: MAE-MAGAP-IGM.

- Makurira, H., Savenije, H., Uhlenbrook, S., Rockström, J., & Senzanje, A. (2009). Investigating the water balance of on-farm techniques for improved crop productivity in rainfed systems: a case study of Makanya catchment, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(1), 93-98.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. Wiley & Sons. New . 392.
- Martinez J, Munda G, & ONeill J. (1988). Weak comparability of values as a foundation for ecological economics . 277-286.
- Martinez, E. (2007). *Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME*.
- Martínez, G. (2012). *Propuesta de ordenamiento de las áreas de producción agrícola, para reducir deslizamientos en el Municipio de San Marcos La Laguna, Sololá*. Guatemala: Tesis de Maestría Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Mbilinyi, B., Tumbo, S., Mahoo, H., & Mkiramwinyi, F. (2007). GIS-based decision support system for identifying potential sites for rainwater harvesting. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32(15), 1074-1081.
- Mendoza, M., Gonzales, D., Geneletti, D., Morales, L., López, E., Israde, I., & Verekerdy, Z. (2008). Uso de Técnicas de Análisis Multicriterio para la priorización de subcuencas y municipios para la conservación, restauración y aprovechamiento de los recursos naturales en la cuenca del lago Cuitzeo.
- Ministerio del Poder Popular para el Ambiente. (2008). *Manual de Conservación de Suelos*.
- Oñate, L. (2007). *Desarrollo de un sistema de información geográfica catastral de Isla de Pascua y evaluación métrica de su cartografía base*. Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- Oweis, T., & Hachum, A. (2006). Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management*, 80(1), 57-73.
- Oweis, T., Hachum, A., & Kijne, J. (1999). Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use efficiency in dry areas (Vol. 7). IWMI.
- Pacheco, O. (2006). *Medidas de conservación para suelos potencialmente erosionables*. Camaguey: Tesis de maestría UDTC.

- Parra, O. (2013). Gestión integrada de cuencas hidrográficas. Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. Universidad de Concepción. .
- Pérez Escobar, F., & Bonilla, B. (2013). *Adquisición de Imágenes Aéreas desde un Tricóptero*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Pizarro, R., Flores, J., Sanguesa, C., Martínez, E., & García, J. (2004). DISEÑO DE OBRAS PARA LA CONSERVACIÓN DE AGUAS Y SUELO.
- Puerta, C. (2015). *TECNOLOGÍA DRONE EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS*. (E. d. ESING, Ed.) Bogotá, Colombia: Tesis Pregrado.
- Quimbita, M. (2016). *Uso civil de drones y la afectación al derecho a la intimidad personal y familiar en el Ecuador*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Quintanilla, I., Gallegos, A., Irimia, J., & Pérez, J. (2005). Estudio y Análisis de receptores GPS monofrecuencia diferencial de bajo coste para la obtención de precisiones submétricas. *Ingeniería Cartográfica*, 1-8.
- Quiróz Rosado, E. (2015). *Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicada a la ingeniería civil*. Madrid, España: Universidad de Extremadura.
- Ramakrishnan, D., Bandyopadhyay, A., & Kusuma, K. (2009). SCS-CN and GIS-based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Watershed, Mahi River Basin, India. *Journal of Earth System Science*, 118(4), 355-368.
- Raudes, M., & Sagastume, N. (2009). *Manual Conservación de Suelos. Programa para la agricultura sostenible en laderas de América Central*. Carrera de Ciencias y Producción Agropecuaria. Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano .
- Robson, S., & James, M. (2014). *Systematic vertical error in UAV-derived topographic models*. EEUU: Origins and solutions.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Poces*.
- SARH-CP. (1982). Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos–Colegio de Postgraduados. 1982. *Manual de Conservación del Suelo y del Agua*. 2a ed. Dirección General de Conservación del Suelo y Agua, Colegio de Postgraduados.
- Seleshi, B., Philippe, L., & Taffa, T. (2009). *Training Manual or agricultural water management*. Ethiopia: Addis Ababa.
- Sharifi, A., & Herwinjen, M. (2004). *Spatial Decision Support Systems*. ITC . 234.

- Sipahi, S., & Mehpare, T. (2010). The analytic hierarchy process and analytic network process: . *An overview of applications* .
- Tian, Y., Su, D., Li, F., & Li, X. (2003). Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas. *Field Crops Research*, 84(3), 385-391.
- TRAGSA. (1994). Empresa de Transformación Agraria S.A. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión.
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-criteria Decision Methods: A Comparative Study* Kluwer Academic Publishers. 288.
- Tumbo, S., Mbilinyi, B., Mahoo, H., & Mkiramwinyi, F. (2006). Determination of suitability levels for important factors for identification of potential sites for rainwater harvesting.
- Universidad Nacional del Nordeste. (2012). *Principios de Fotogrametría*. EEUU: Photogrammetric System.
- Vargas, R. (2009). *Mapeo digital del suelo y su evaluación con fines de producción de caña de azúcar en los municipios de Ixiamas y San Buenaventura*. La Paz Bolivia: Conservación Estratégica.
- Villa, Á. (2016). *Modelos de Zonificación utilizando Información Geoespacial a través de SIG, para establecer Categorías de Manejo en función de los conflictos de la reserva hídrica y ecológica de San Cristóbal Galápagos*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- Villarreal, J., & Zárate, B. (2015). *Análisis de la precisión de levantamientos topográficos mediante el empleo de vehículos no tripulados (UAV) respecto a la densidad de puntos de control*. Loja, Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja.
- Weibull, W. (2008). A statistical distribution function of wide applicability. *National Institute of Standards and Technology* .
- Yuste Martin, N., Vargas, V., & Moya, H. (2013). *Teledetección Ambiental de Alta Resolución mediante aplicación de Vehículos Aéreos no tripulados*. Madrid, España: Sociedad Española de Ciencias Forestales.

## ANEXOS

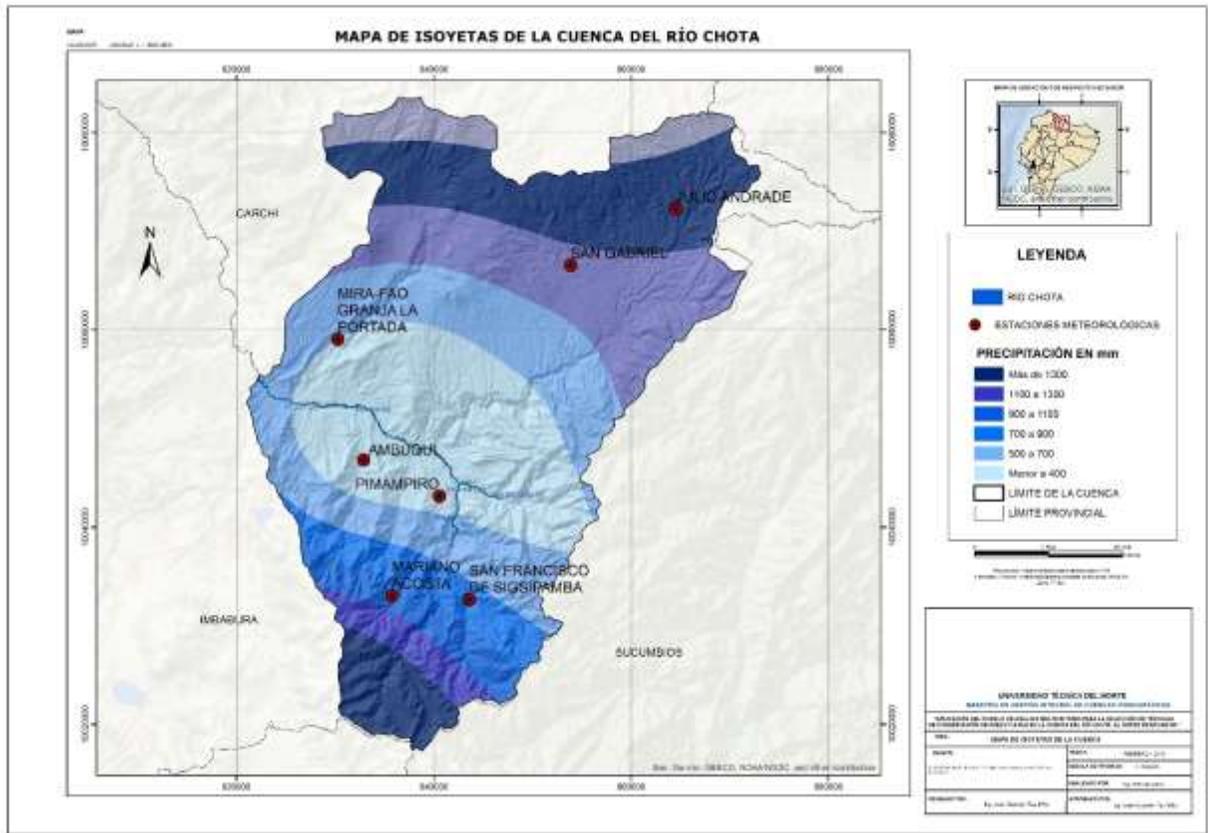
### Anexo 1. Coeficientes de relación de las estaciones vecinas.

Estaciones	Ecuación	Valor de r (coeficiente de correlación)	Grados de libertad	Niveles de significación	
				5%	1%
Ambuqui-Pimampiro	$y = 0.92x + 12.01$	0.97**	11	0.553	0.684
El Ángel-San Gabriel	$y = 0.74x + 29.92$	0.96**	11	0.553	0.684
Julio Andrade-San Gabriel	$y = 0.77x + 9.56$	0.97**	11	0.553	0.684
Mariano Acosta-Ambuqui	$y = 1.66x + 39.64$	0.91**	11	0.553	0.684
Pimampiro-Ambuqui	$y = 0.93x + 12.01$	0.97**	11	0.553	0.684
San Francisco de Sigsipamba-Julio Andrade	$y = 0.35x + 54.44$	0.6*	11	0.553	0.684
San Gabriel-El Ángel	$y = 0.74x + 29.92$	0.96**	11	0.553	0.684

### Anexo 2. Estimadores estadísticos de las estaciones meteorológicas

Estaciones	Desviación estándar	Media	Coefficiente de variación (CV)
Ambuqui	131.45	447.49	29.37%
El Ángel	221.02	864.88	25.55%
Julio Andrade	263.14	1090.25	24.14%
Mariano Acosta	149.44	558.19	26.77%
Pimampiro	214.67	1058.26	20.29%
San Francisco de Sigsipamba	323.06	1153.63	28.00%
San Gabriel	206.89	1000.39	20.68%

**Anexo 3.** Mapas de isoyetas de la cuenca del río Chota



**Anexo 4.** Precipitación media anual & Precipitación según estudio Hidrológico del río Mira al año 2005.

Estación	Altitud (m.s.n.m)	PRECIPITACIONES (en mm)		
		Media anual (investigación)	Media anual (INAMHI al 2005)	Variación en %
Ambuqui	1880	448	478	7%
El Ángel	3000	944	944	0%
Julio Andrade	2890	1154	1168	1%
Mariano Acosta	2980	1218	-	-
Pimampiro	2090	558	547	-2%
San Francisco De Sigsipamba	2230	1058	1072	1%
San Gabriel	2860	1000	959	-4%

**Anexo 5.** Asignación del número primo según el tipo de drenaje del suelo

<b>Tipo de drenaje</b>	<b>N° Primo</b>	<b>Descripción</b>
A	5	Eliminación rápida del agua en relación al aporte de la lluvia. Suelos generalmente de texturas gruesas. Normalmente ningún horizonte permanece saturado durante varios días después de las precipitaciones.
B	7	Eliminación fácil del agua de lluvia, aunque no rápidamente. Suelos de textura media a fina. Algunos horizontes pueden permanecer saturados durante unos días después de las precipitaciones. Sin moteados en los 100 cm superiores o con menos de un 2%. El nivel freático se encuentra a profundidades mayores de 120 cm.
C	11	Eliminación lenta del agua en relación al aporte de la lluvia. Suelos con un amplio intervalo de texturas. Algunos horizontes pueden permanecer saturados durante más de una semana después del aporte de agua. Moteados del 2 al 20% entre 60 y 100 cm. Presencia de una capa de permeabilidad lenta, o un nivel freático alto (60-90 cm de profundidad).
D	13	Eliminación muy lenta del agua en relación al suministro. Suelos con un amplio intervalo de texturas. Los horizontes permanecen saturados por agua durante varios meses.

**FUENTE:** Porta y López-Acevedo, 2005. Agenda de Campo; MAG y MIRENEM, 1995. Metodologías para la Determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras de Costa Rica.

**Anexo 6.** Asignación del número primo según el uso de suelo de la cuenca

<b>Uso de suelo cuenca del Chota</b>	<b>Uso de suelo SCS</b>	<b>N° Primo</b>
Cultivo Anual	Cultivos en hilera R/N	17
Cultivo Semipermanente	Rotación de cultivos densos R/N	19
Pastizales	Pradera media	23
Páramo	Pradera muy buena	29
Vegetación Arbustiva	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	31
Cultivo Permanente	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	37
Bosque Nativo	Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy espesa	41
Erial/Sin Cobertura Vegetal	Rocas permeables	43

**Anexo 7.** Número de curva utilizado en el cálculo del coeficiente de escorrentía de la cuenca.

Uso de suelo de la cuenca	Pendiente en %	CN Asignado (III)			
		Drenaje del suelo			
		A	B	C	D
Cultivo Anual	<3	x	x	x	x
Cultivo Anual	>=3	x	90	x	x
Cultivo Semipermanente	<3	x	x	x	x
Cultivo Semipermanente	>=3	x	94	x	x
Pastizales	<3	x	92	x	x
Pastizales	>=3	94	94	89	x
Páramo	<3	x	x	x	x
Páramo	>=3	92	95	94	89
Vegetación Arbustiva	<3	x	x	x	x
Vegetación Arbustiva	>=3	90	92	89	92
Cultivo Permanente	<3	x	x	x	x
Cultivo Permanente	>=3	x	93	x	x
Bosque Nativo	<3	x	x	x	x
Bosque Nativo	>=3	95	95	88	93
Erial/Sin Cobertura Vegetal	<3	x	x	x	x
Erial/Sin Cobertura Vegetal	>=3	93	97	x	x
Infraestructura Antrópica/cuerpos de agua	<3	x	x	x	97
Infraestructura Antrópica/cuerpos de agua	>=3	x	98	x	x

**Anexo 8.** Cualificación y cuantificación de los factores ambientales de la cuenca.

<b>Comparaciones</b>	<b>Criterio más importante</b>	<b>Cuanto más importante</b>	<b>Calificación Numérica</b>
Coeficiente de escorrentía-Precipitación	Coeficiente de escorrentía	Moderada	3
Pendiente de terreno-Precipitación	Pendiente del terreno	Fuerte	5
Uso de suelo-Precipitación	Uso del suelo	Extrema	9
Textura del suelo-Precipitación	Textura del suelo	Fuerte	5
Profundidad del suelo-Precipitación	Profundidad del suelo	Moderada	3
Pendiente del terreno-coeficiente de escorrentía	Pendiente del terreno	Muy fuerte	7
Uso de suelo-coeficiente de escorrentía	Uso del suelo	Muy fuerte	7
Textura del suelo-Coeficiente de escorrentía	Ninguno	Igual	1
Profundidad del suelo-coeficiente de escorrentía	Ninguno	Igual	2
Pendiente del terreno-uso del suelo	Pendiente del terreno	Moderada	3
Pendiente del terreno-textura del suelo	Pendiente del terreno	Moderada	3
Pendiente del terreno-profundidad del suelo	Pendiente del terreno	Fuerte	5
Uso del suelo-textura del suelo	Ninguno	Igual	1