

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Análisis del cambio de cobertura de suelo en la cuenca del río Paz a base de la teledetección en los años 1999, 2014 y 2023 para la mitigación de inundaciones

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por Alejandro Spross Lopera para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2024



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



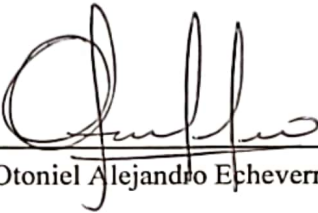
Análisis del cambio de cobertura de suelo en la cuenca del río Paz a base de la teledetección en los años 1999, 2014 y 2023 para la mitigación de inundaciones

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por Alejandro Spross Lopera para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

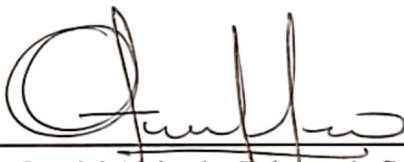
Guatemala,

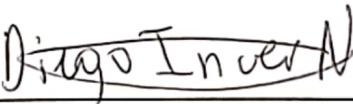
2024

Vo.Bo. :

(f)   
Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

(f)   
Ing. Diego Josue Incer Nuñez

(f)   
Ing. Danilo Antonio Rodríguez Cerón

Fecha de aprobación: Guatemala, 24 de junio de 2024.

## CONTENIDO

Lista de cuadros .....	vii
Lista de figuras.....	viii
Resumen.....	x
Abstract .....	xii
I. Introducción.....	1
II. Justificación.....	3
III. Objetivos .....	5
A. Objetivo General .....	5
B. Objetivos Específicos .....	5
IV. Marco teórico .....	6
A. Cuenca hidrográfica .....	6
B. Cuencas hidrográficas de Guatemala .....	6
C. División y partes de una cuenca hidrográfica .....	8
D. Caracterización morfométrica de la cuenca .....	9
E. Cobertura de la tierra y cambios de uso de suelo .....	13
F. Teledetección.....	13
G. La teledetección en el estudio del cambio de cobertura de suelo.....	13
H. Sistemas de información geográfica .....	14
I. Bandas espectrales .....	16
J. Composiciones coloreadas en la teledetección.....	16
K. Combinación de bandas espectrales.....	18
L. Clasificación de imágenes para la determinación de cobertura de suelo.....	20
M. Análisis visual de imágenes satelitales.....	21
N. Etapas de la clasificación supervisada de imágenes satelitales.....	22
O. Algoritmos para la clasificación de píxeles.....	24

P. Matriz de confusión.....	28
Q. Fuentes de error en una clasificación temática.....	30
R. Gestión de riesgo de inundaciones .....	33
S. Los SIG y la gestión del riesgo de inundaciones .....	34
V. Metodología.....	37
A. Obtención de la cuenca .....	37
B. Elaboración de los mapas de cobertura de suelo .....	44
VI. Resultados.....	58
A. Morfometría de la cuenca.....	58
B. Resultados de cambio de cobertura de suelo entre 1999-2014 y 2014-2023 .....	60
C. Validación de la información obtenida.....	63
VII. Discusión de resultados .....	73
A. Análisis de cambios de cobertura de suelo en el periodo de 1999-2014.....	73
B. Análisis de cambios de cobertura de suelo en el periodo de 2014-2023.....	76
VIII. Conclusiones .....	81
IX. Recomendaciones .....	82
X. Bibliografía .....	84
XI. Anexos .....	91

## LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
Cuadro 1. Valores de Kc .....	10
Cuadro 2. Bandas espectrales Landsat 8.....	16
Cuadro 3. Definición de macro clases y categorías para las firmas espectrales .....	51
Cuadro 4. Cobertura de suelo entre los años 1999, 2014 y 2023.....	61
Cuadro 5. Matriz de error para el año 2023 .....	64
Cuadro 6. Reclasificación de uso de suelos .....	70
Cuadro 7. Matriz de error clasificación 2023 .....	70
Cuadro 8. Evolución del cambio de uso de suelos.....	71
Cuadro 9. Cambio de uso de suelos para el periodo 1999-2014.....	73
Cuadro 10. Distribución de uso de suelo en la cuenca según MAGA 2020 .....	77
Cuadro 11. Cambio de uso de suelos para el periodo 2014-2023.....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
Figura 1. Vertientes de Guatemala .....	7
Figura 2. Satélite Landsat 7 .....	15
Figura 3. Satélite Landsat 8 .....	15
Figura 4. Combinaciones de bandas para los satélites Landsat .....	17
Figura 5. Uso de imágenes satelitales para el análisis de cobertura de suelo .....	20
Figura 6. Etapa de entrenamiento .....	23
Figura 7. Clasificación por mínima distancia .....	25
Figura 8. Clasificación por paralelepípedos.....	26
Figura 9. Clasificación por máxima probabilidad.....	27
Figura 10. Clasificación por mapeo de ángulo espectral .....	28
Figura 11. Obtención de matriz de confusión .....	29
Figura 12. Fuente de error medioambiental por nubosidad .....	32
Figura 13. Inundación en la Ribera del río Paz.....	33
Figura 14. Programa Hec-Ras en Qgis.....	36
Figura 15. Interfaz portal Earthdata .....	38
Figura 16. Ruta de acceso a "combinar" .....	39
Figura 17. Esquema general de la herramienta "combinar" .....	40
Figura 18. Ruta de acceso a "Fill Sinks".....	41
Figura 19. Ruta de acceso a "Channel network and drainage basins" .....	41
Figura 20. Vista de la herramienta " Channel network and drainage basins" .....	42
Figura 21. Vista de la herramienta "Upslope Area" .....	43
Figura 22. Vista de la herramienta "r.to.vect" .....	43
Figura 23. Área y ríos tributarios de la cuenca .....	44
Figura 24. Vista general del portal USGS.....	45
Figura 25. Selección del área de interés en USGS.....	46
Figura 26. Selección de la colección de imágenes.....	46
Figura 27. Selección de imágenes satelitales.....	47
Figura 28. Carga de imágenes satelitales en QGIS .....	47
Figura 29. Ruta de acceso al plugin "Semi-automatic classification" .....	48
Figura 30. Corrección atmosférica.....	49
Figura 31. Ruta de acceso para el corte de imágenes satelitales.....	50
Figura 32. Ruta de acceso a juego de bandas y vista general .....	52
Figura 33. Vista general del juego de bandas.....	52
Figura 34. Vista general de la herramienta "SCP y DOCK" .....	53
Figura 35. Entrenamiento de las macro clases.....	54
Figura 36. Vista general de la herramienta " Band processing " .....	54

Figura 37. Clasificación preliminar .....	55
Figura 38. Comparativa clasificación sin majority filter .....	55
Figura 39. Clasificación con majority filter .....	56
Figura 40. Vista general de la herramienta "obtención de resultados" .....	56
Figura: 41. Vista general de la herramienta "obtención de resultados" .....	57
Figura 42. Resultados preliminares de la herramienta "obtención de resultados".....	57
Figura 43. Perfil de elevación del cauce principal .....	59
Figura 44. Imagen clasificada 2023 .....	62
Figura 45. Imagen clasificada 2014 .....	62
Figura 46. Imagen clasificada 1999 .....	62
Figura 47. Territorios artificializados.....	65
Figura 48. Territorios agrícolas .....	66
Figura 49. Comparación de las firmas espectrales.....	66
Figura 50. Territorios artificializados con imágenes Landsat .....	67
Figura 51. Territorios artificializados con imagen de Google Earth.....	67
Figura 52. Territorios artificializados tras realizar la clasificación de macro clases .....	68
Figura 53. Zona de manglar en la parte baja de la cuenca .....	68
Figura 54. Zona de manglar tras realizada la clasificación.....	69
Figura 55 Clasificación 2023 con menos macro clases. ....	72
Figura 56. Comparativa de error de clasificación de categoría cuerpos de agua.....	75
Figura 57. Clasificación 2014 .....	75
Figura 58. Clasificación 1999 .....	76
Figura 59. Mapa de uso de suelo según categorías filtradas del MAGA 2020 .....	77
Figura 60. Geo portal del SENTA para la aproximación de usos de suelo .....	78
Figura 61. Cambio de uso de suelos cuenca baja Río Paz .....	79

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis de la dinámica de cambios de cobertura de suelo en la cuenca del río Paz para identificar las variables principales que puedan tener relación con las inundaciones en la cuenca baja. Esto, por medio del análisis de imágenes satelitales con intervalos aproximados de 10 años, con el fin de cuantificar el deterioro de la cuenca y así servir como un estudio exploratorio para identificar posibles soluciones a la problemática.

El río Paz es un afluente fronterizo que divide Guatemala y el país vecino de El Salvador. La cuenca tiene un tamaño de 2632.61  $km^2$ ; se divide en 66 % de territorio guatemalteco y 34 % de territorio salvadoreño. Este río pertenece a los afluentes de la región del pacífico del país, por ende, comparte características de una pendiente elevada y un recorrido no tan extenso, lo que hace propenso a inundar las áreas aledañas al río, sobre todo en su cuenca baja.

Tras haber realizado el análisis de la morfometría de la cuenca se encontró que los valores de densidad de drenaje, el factor de forma y el índice de compacidad presentan valores que corresponden a una cuenca bien drenada y con características adecuadas para la correcta gestión de valores de agua elevados en un corto tiempo por lo que la persistencia de las inundaciones en la cuenca baja en la temporada lluviosa indica que la cuenca presenta algún tipo de deterioro ambiental puesto que naturalmente no debería de sufrir las crecidas que ha tenido en los últimos años.

A través del análisis multitemporal del uso de suelo de la cuenca se obtuvo que en los últimos 20 años la categoría que más ha crecido ha sido la agricultura principalmente con

los cultivos de caña de azúcar y granos básicos. El aumento significativo y sin control de esta categoría ha provocado que se deriven muchos canales del río para su uso en el riego, provocando que se disminuya el caudal sobre todo en su época de estiaje, además la tala del hábitat natural en el cauce del río ha provocado que, en épocas de crecida, el río arrastre mucho sedimento de la cuenca alta y media, depositándolo en la parte baja lo cual provoca asolvamiento del cauce que es la causa principal de rebalse en la cuenca baja.

**Palabras clave:** *teledetección, cambio de cobertura de suelo, mitigación*

## ABSTRACT

The objective of this thesis is to carry out an analysis of the dynamics of land cover changes in the Paz River basin to identify the main variables that may be related to flooding in the lower basin. This, through the analysis of satellite images with approximate intervals of 10 years, to quantify the deterioration of the basin and thus serve as an exploratory study to identify possible solutions to the problem.

The Paz River is a border river that divides Guatemala and the neighboring country of El Salvador. The basin has a size of  $2632.61 \text{ km}^2$  It is divided into 66% Guatemalan territory and 34% Salvadoran territory. This river belongs to the tributaries of the Pacific region of the country; therefore, it shares characteristics of a high slope and a not so extensive route, which makes it prone to flooding the areas surrounding the river, especially in its lower basin.

After having carried out the analysis of the morphometry of the basin, it was found that the drainage density values, the shape factor and the compactness index present values that correspond to a well-drained basin and with adequate characteristics for the correct management of drainage values. elevated water in a short time, so the persistence of flooding in the lower basin in the rainy season indicates that the basin presents some type of environmental deterioration since naturally it should not suffer the floods it has had in recent years.

Through the multi-temporal analysis of the land use of the basin, it was obtained that in the last 20 years the category that has grown the most has been agriculture, mainly with

sugar cane and basic grain crops. The significant and uncontrolled increase in this category has caused many river channels to be diverted for use in irrigation, causing the flow to decrease, especially during the dry season, in addition to the cutting down of the natural habitat in the riverbed. It has caused, in times of flood, the river to drag a lot of sediment from the upper and middle basin, depositing it in the lower part which causes siltation of the channel, which is the main cause of overflow in the lower basin.

**Keywords:** *remote sensing, land cover change, mitigation*

## I. INTRODUCCIÓN

En la búsqueda continua por comprender y abordar los desafíos ambientales que enfrenta nuestro planeta, la teledetección mediante imágenes satelitales ha emergido como una herramienta invaluable. En un mundo cada vez más interconectado y afectado por cambios ambientales, la capacidad de observar la Tierra desde el espacio ha revolucionado nuestra comprensión de los ecosistemas y los procesos ambientales a escala global, regional y local. La información recopilada a través de la teledetección proporciona una visión detallada y holística de la superficie terrestre, permitiendo la monitorización de recursos naturales, la detección de cambios ambientales, la predicción de fenómenos naturales y la evaluación de la salud de los ecosistemas.

En este contexto, este trabajo se centra en explorar y demostrar la importancia de la teledetección como una herramienta fundamental para la generación de información ambiental y la resolución de problemáticas asociadas. Desde la deforestación hasta gestión de recursos hídricos y la planificación urbana sostenible, la teledetección ofrece una perspectiva única y poderosa que complementa las técnicas tradicionales de recolección de datos en el estudio y la gestión de nuestro entorno natural.

A través del análisis de imágenes satelitales y el empleo de técnicas avanzadas de procesamiento de datos, esta investigación pretende abordar desafíos en el uso de suelos, identificando patrones, tendencias y anomalías que de otro modo podrían pasar desapercibidos. Al aprovechar la capacidad de la teledetección para capturar información a lo largo del espectro electromagnético, desde la luz visible hasta las microondas, se pueden obtener datos multidimensionales que revelan aspectos cruciales de la dinámica ambiental y los procesos ecológicos.

En última instancia, este trabajo aspira a destacar el potencial transformador de la teledetección en la gestión ambiental y la toma de decisiones informada. Al integrar el conocimiento científico con tecnologías de vanguardia, se busca proporcionar una base sólida para enfrentar los retos ambientales actuales y futuros, promoviendo así la sostenibilidad y el bienestar de nuestro planeta y las generaciones venideras.

## II. JUSTIFICACIÓN

Guatemala es un país tropical donde la amenaza climática muchas veces es la que protagoniza la principal amenaza para los habitantes del país. Debido al cambio climático cada vez se sienten inviernos más intensos, con lluvias torrenciales más frecuentes. A pesar de eso, es poca o nula la respuesta de la administración de turno para prepararse ante estos eventos, pues únicamente se piensa en la mitigación y no la prevención. (Hernández, A. (2012)

La problemática de las inundaciones en los ríos es particularmente fuerte en aquellos pertenecientes a la vertiente del pacífico. Estos ríos se caracterizan por su corta longitud y grandes pendientes. Usualmente, nacen a una altura promedio de 3,000 msnm y descienden hasta el nivel del mar. La combinación de estos factores con un uso inadecuado del suelo provoca que estos cuerpos de agua sean propensos a tener inundaciones. Por ende, es imperativo encontrar soluciones para este problema tan persistente y sobre todo poder crear modelos digitales de investigación que puedan ser aplicados en diferentes cuencas del país que compartan características similares.

Una solución muy eficaz a la problemática planteada es a través de la readecuación de los usos de suelo, pues son muchas veces el mal uso de este es lo que lleva a una mala gestión de los recursos hídricos en una cuenca y por ende el deterioro del recurso. Para poder realizar un correcto uso de suelo es posible asistirse de la teledetección, la cual es una técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra (IGN,2020).

Hoy en día las herramientas para la teledetección están ampliamente desarrolladas y abiertas al público. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) es un portal gratuito de información que contiene plataformas de referencia donde descargar datos satélites. También existe su contraparte europea, la herramienta Landsat Viewer online desarrollada por EOS Inc. (EOS stands for the Earth Observing System) permite la gestión y descarga de imágenes satélite de forma gratuita. Desde el visor se puede obtener las imágenes de satélite más actuales de Landsat 7-8, Sentinel-1 y 2, CBERS-4, MODIS, datos aéreos del NAIP u obtener imágenes de satélite históricas de Landsat 4-5. Además, permite hacer análisis de los datos, teniendo disponibles más de 20 combinaciones de bandas e índices predeterminados como NDVI, NBR, SAVI.

Es por ello que, es idóneo aplicar estas herramientas que a través de una interpretación técnica es posible obtener resultados muy favorables para el análisis de datos y el desarrollo de soluciones para afrontar muchas de las problemáticas que se viven en la actualidad del país.

La cuenca en cuestión es binacional, es decir compartida entre Guatemala y El Salvador, dificultando de gran manera su gestión, por esto mismo la cuenca carece de información completa para su análisis espacial pues cada nación cubre únicamente la porción correspondiente a su territorio, dificultando de gran manera cualquier trabajo de investigación que se quiera realizar en la cuenca completa.

### **III.OBJETIVOS**

#### **A. Objetivo General**

Elaborar un análisis de la dinámica de cambios de cobertura de suelo en la cuenca del Río Paz para identificar posibles variables que afectan la susceptibilidad de la región a tener inundaciones.

#### **B. Objetivos Específicos**

- Realizar una caracterización morfométrica de la Cuenca del Río Paz.
- Estimar el cambio de uso de suelos a través de clasificación supervisada de imágenes LANDSAT en los años 1999, 2014 y 2023.
- Elaborar mapas temáticos que representen la evolución a través del tiempo en las clases de cambio en el uso de suelo.
- Verificar la precisión de la metodología de análisis de cambio de uso de suelos por medio de la teledetección, en cuencas de gran tamaño.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es una unidad que permite la gestión que se realiza dentro de la cuenca hidrográfica. Se define como el área en donde se almacenan las aguas provenientes de la precipitación con el objetivo de formar un solo curso de agua; considera la dinámica del agua en el subsuelo para identificar la localización de acuíferos y sus diversas zonas de recarga. Las cuencas hidrográficas de la República de Guatemala se dividen en tres clasificaciones: las que vierten al Océano Pacífico, la vertiente del mar caribe y las que vierten en el Golfo de México (Suarez, 2011).

### A. Cuencas hidrográficas de Guatemala

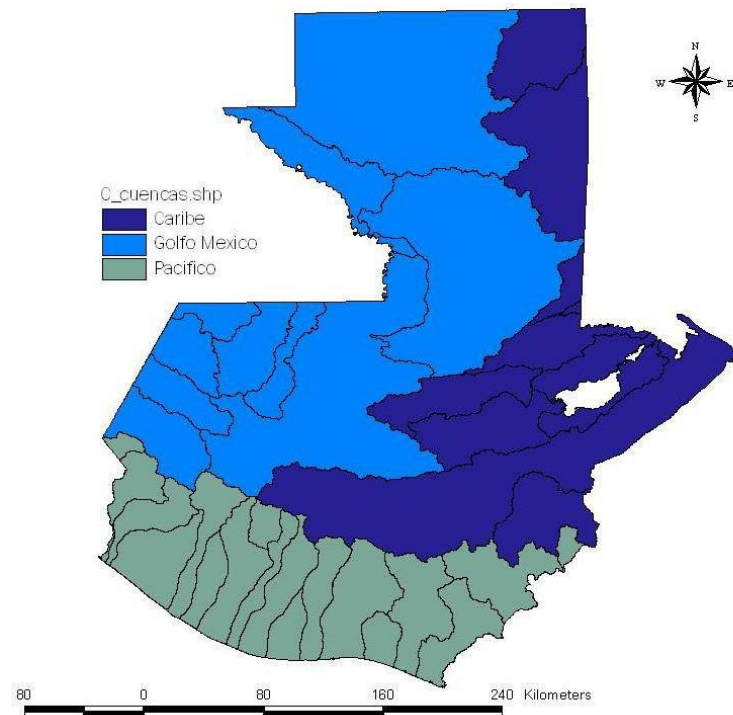
Según Suarez (2011), las cuencas hidrográficas de Guatemala pueden ser clasificadas en 3 vertientes que son definidas por la topografía del país, estas son:

1. **Vertiente del Pacífico:** Cuenta con ríos cortos que nacen a grandes alturas respecto al nivel del mar, por lo que el descenso a su desembocadura tiene la característica de ser con pendientes elevadas. Durante su paso, los ríos arrastran escoria y ceniza volcánica lo que provoca en sus zonas bajas áreas vulnerables a inundaciones.
2. **Vertiente del golfo de México:** Se presentan los ríos con mayor longitud del país. Tienen cauces establecidos con recorridos sinuosos. Las pendientes son relativamente suaves, por ende, las velocidades en sus cauces son menores.

3. **Vertiente del Atlántico:** Son ríos extensos y profundos, por ende, óptimos para la navegación y pesca. Tienen pendientes más suaves y desarrollos menos bruscos. Poseen crecidas de larga duración y tiempos de propagación. En la Figura 1 se observa la distribución de las vertientes por cuencas del país.

**Figura 1.**

*Vertientes de Guatemala*



*Nota.* FECECHI (2017)

## **B. División y partes de una cuenca hidrográfica**

### **1. *Subcuencas***

Se entiende como el conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente.

### **2. *Microcuencas***

Se define como el área en la que su drenaje va a dar al caudal principal de una subcuenca; por lo tanto, una subcuenca se compone o divide por varias microcuencas.

### **3. *Cuenca alta***

La cuenca alta corresponde a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por las divisorias de aguas.

### **4. *Cuenca media***

Área donde se juntan las aguas recogidas provenientes de las partes altas y donde el río principal mantiene un cauce definido.

### **5. *Cuenca baja o zonas transicionales***

Los ríos desembocan a ríos mayores o a zonas bajas tales como estuarios y humedales (Ordoñez, 2011).

## C. Caracterización morfométrica de la cuenca

El análisis morfométrico de una cuenca hidrográfica por medio de parámetros de forma, relieve y drenaje es fundamental para modelar la cuenca de manera que sea posible determinar el movimiento y captación del agua. Además, esta modelación permite explicar cómo se distribuye el agua superficial, con el fin de predecir la oferta hídrica disponible, completando con otros modelos matemáticos (Gaspari et al. 2012).

### 1. Superficie y perímetro de la cuenca

Se refiere al área proyectada en un plano horizontal, es de forma muy irregular; se obtiene después de delimitar la cuenca (Villón 2002). Este parámetro indica la superficie del área drenada que cubre el perímetro de la cuenca y generalmente se indica en  $km^2$ . El perímetro de la cuenca corresponde a la longitud total del parteaguas (Breña y Jacobo, 2006).

Es obtenida después de delimitar la cuenca y se refiere al área proyectada en un plano horizontal (Villón, 2002). El parámetro indica la superficie del área drenada que cubre el perímetro de la cuenca. El perímetro de la cuenca corresponde a la longitud total del parteaguas. (Breña y Jacobo, 2006).

### 2. Factor de formade Horton (Kf)

Es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca.

$$Kf = \frac{\text{ÁREA}}{\text{Longitud}^2} = \frac{A}{L^2}$$

Describe que tan alargada puede ser la cuenca. Un factor de forma bajo describe una cuenca que está menos sujeta a creciente que una de la misma área con factor de forma mayor.

### 3. Índice de compacidad de Gravelius (Kc)

Compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia.

$$K = \frac{P}{P_c} = \frac{P}{2 \pi R}$$

Donde:

P: perímetro de la cuenca (longitud de la línea parteaguas),

Pc: es el perímetro de la circunferencia

R: es el radio de la circunferencia.

Este coeficiente es adimensional y tiene como definición un valor de uno para cuencas de forma exactamente circular y nunca tendrá valores inferiores a uno. Mientras más se acerquen los valores de compacidad de la cuenca a 1 indicará la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento.

Se han establecido tres categorías para la clasificación de acuerdo con este parámetro las cuales se muestran en el Cuadro 1:

#### Cuadro 1.

*Valores de Kc*

Valores de Kc	Forma
1.00-1.25	Redonda a oval redonda
1.25-1.5	De oval redonda a oval oblonga
1.5-1.75	DE oval oblonga a rectangular oblonga

*Nota.* Breña y Jacobo (2006)

#### 4. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es definida como la longitud total de los cauces de la cuenca dividida por el área total de drenaje.

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Donde:

Dd: es la densidad de corriente en 1/km

L: es la suma de las longitudes de las corrientes, en km

A: es el área de la cuenca en  $km^2$

Una densidad alta refleja que la cuenca está bien drenada, por ende, debería de responder rápidamente al influjo de la precipitación, valores de densidad de drenaje próximo a 0.5 km/km<sup>2</sup> o mayores indican la eficiencia de la red de drenaje (Linsley et al., 1977).

#### 5. Pendiente de la cuenca

Este parámetro mide la pendiente media en dos ejes principales (x, y) y a partir de estos valores se determina la pendiente media de la cuenca, definida como la inclinación o declive promedio de su topografía.

El método de mayor aplicación es el de Horton y para estimar la pendiente media de la cuenca de análisis se traza una malla cuyo eje principal (x) siga aproximadamente el sentido del cauce principal (Breña y Jacobo 2006).

## 6. Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía varía con la pendiente, condiciones de la superficie y de la cubierta vegetal y el tipo de suelo hidrológico. Las superficies que son relativamente impermeables como las calles y plazas de aparcamiento tienen coeficientes de escorrentía que se aproximan a uno. Las superficies con vegetación para interceptar la escorrentía superficial y las que permiten la infiltración de las precipitaciones tienen coeficientes de escorrentía más bajas (cerca de 0). Si todos los demás factores son iguales, una zona con una mayor pendiente tendrá más escorrentía de aguas pluviales y así un coeficiente de escorrentía más alto que una zona con una pendiente inferior.

Los suelos que tienen un alto contenido de arcilla no permiten mucha infiltración y por lo tanto tienen coeficientes relativamente altos de escurrimiento, mientras que los suelos con alto contenido de arena tienen mayores tasas de infiltración y bajos coeficientes de escorrentía.

Este coeficiente se puede cuantificar en términos de tipo de suelo, pendiente topográfica y tipo de cobertura. El coeficiente de escorrentía  $C$  entonces se puede definir como:

$$C_c = \frac{\sum C_i A_i}{\sum A_i}$$

Donde:  $C_c$  es el coeficiente de escorrentía compuesto,  $C_i$  son los coeficientes de escorrentía de áreas homogéneas y  $A_i$  son áreas individuales con  $C$  homogéneo. Esta información se puede estimar mediante imágenes satelitales, cartografía de suelos y modelos digitales del terreno.

#### **D. Cobertura de la tierra y cambios de uso de suelo**

La cobertura de la tierra hace referencia a los elementos que se encuentran en la superficie, ya sean naturales o creadas por el ser humano. Se puede categorizar la cobertura de tierra en superficies biofísicas como la superficie cultivable, urbana, cobertura forestal, etc. suelo (Ministerio de Agricultura, 2011).

Analizando los cambios en la cobertura de tierra es posible determinar, analizar los efectos y determinar que provoca la humanidad en los ecosistemas en donde se desarrolla su actividad. El cambio de cobertura de suelo y uso de suelo son considerados como los factores que van a tener mayor impacto global sobre la biodiversidad al año 2100, debido a sus devastadores efectos sobre la disponibilidad de hábitat y extinción de especies (Sala et al., 2000). Estos impactos en su mayoría se han producido por la pérdida y/o transformación de ecosistemas boscosos y praderas naturales, en terrenos habilitados para diferentes usos tales como el desarrollo agrícola, ganadero, forestal y urbano (Sala et al., 2000).

#### **E. Teledetección**

Se refiere como teledetección a la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre por medio de sensores instalados en plataformas espaciales. Las imágenes son generadas debido a la interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, las cuales son luego procesada para obtener datos de gran relevancia de la superficie de la tierra (IGN, 2020).

#### **F. La teledetección en el estudio del cambio de cobertura de suelo**

La teledetección puede ser una herramienta muy útil para la adquisición de conocimiento para el análisis de cobertura de suelo. El procesamiento de datos por imágenes satelitales permite realizar estudios tanto de pequeña como gran escala. Es

posible realizar estudios de: degradación de suelos, caracterización de suelos, el estado de vegetación terrestre, el uso de los suelos, etc. (Fernández et al. 2013, Pérez y García 2013).

## **G. Sistemas de información geográfica**

El programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Esta serie de datos, que se inició en 1972, es la más larga de la historia y continúa registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada; de manera general cada píxel en su imagen tiene un tamaño con el que se podría cubrir un campo de béisbol (Alcaraz, 2013).

### **1. Satélite Landsat 7**

Este satélite fue lanzado en el año 1999. Las características principales del Landsat 7 incluyen una banda pancromática con una resolución espacial de 15 metros, un calibrador solar de apertura total integrado, una calibración radiométrica absoluta del cinco por ciento y un canal infrarrojo térmico con una mejora cuatro veces mayor en la resolución espacial que Thematic Mapper (TM) [Mapeador temático] (USGS, 2021). La Figura 2 muestra un arte conceptual de como se encuentra el satélite Landsat 7 en la atmósfera.

**Figura 2.**

*Satélite Landsat 7*



*Nota.* USGS (2021)

**2. Satélite Landsat 8**

Landsat Data Continuity Mission (LDCM) [Misión de continuidad de datos Landsat] es el octavo satélite de observación de la serie Landsat y continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia. Este programa amplía, mejora y avanza en el registro de imágenes multiespectrales, manteniendo la misma calidad de sus siete predecesores, en la Figura 3 se muestra una representación artística del Landsat 8 (Alcaraz, 2013).

**Figura 3.**

*Satélite Landsat 8*



*Nota.* uva.es (2013)

## H. Bandas espectrales

Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. Una banda nueva (1) (azul-profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución (Tabla. 2). El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 18 kilómetros de este a oeste (106 km por 114 km), en el Cuadro 2 se muestran las longitudes de onda, así como la resolución de cada banda contenida en Landsat 8 (Alcaraz, 2013).

### Cuadro 2.

#### *Bandas espectrales Landsat 8*

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)  February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100	

*Nota.* USGS (2013).

## I. Composiciones coloreadas en la teledetección

Gracias a la información multispectral que generan la mayor parte de los sensores espaciales, pueden obtenerse distintas composiciones de color basta para ello aplicar a cada uno de los tres colores "primarios", a una banda distinta de la imagen seleccionada con el criterio y en el orden que se estime más oportuno (Velásquez, 2018).

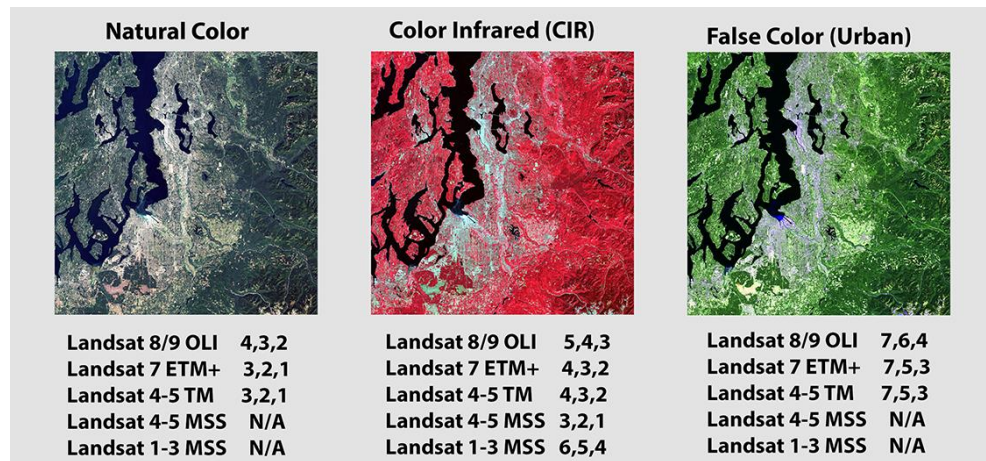
El proceso permite visualizar, simultáneamente imágenes de distintas porciones del espectro, lo que facilita la delimitación visual de algunas coberturas. Por tratarse de tres bandas distintas, la LUT aplicada a una composición en color presenta tres columnas con distintos valores.

La elección de las bandas para realizar la composición y el orden de los colores destinados a cada una, dependen del sensor sobre el que se trabaje y de la naturaleza del trabajo a realizar. La composición más habitual es la denominada falso color fruto de aplicar los cañones rojo verde y azul del monitor sobre las bandas correspondientes al infrarrojo cercano, rojo y verde

El sensor Landsat 8 con 11 bandas espectrales, ofrece la posibilidad de realizar un amplio número de composiciones coloreadas, en la Figura 4 se muestran las 3 combinaciones más utilizadas siendo estas: natural color [color natural], color infrared (CIR) [color infrarrojo] y false color (urban) [falso color (urbano)] (Velásquez, 2018).

**Figura 4.**

*Combinaciones de bandas para los satélites Landsat*



*Nota.* USGS (2021)

## **J. Combinación de bandas espectrales**

Los satélites Landsat emplean múltiples bandas espectrales para captar la radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre en distintas longitudes de onda. Esta capacidad permite discriminar entre diferentes tipos de cobertura terrestre (vegetación, suelo, agua) y obtener información detallada sobre su composición y estado.

### ***1. Combinación R=4, G=3, B=2***

Se le conoce como la combinación “falso color estándar”. La vegetación aparece en tonos de rojo, las áreas urbanas en tonos de cian (celeste) y los suelos varían de café oscuro a café claro. La nieve, hielo y nubes aparecen en color blanco o ligeramente celeste. Los bosques de coníferas aparecen más oscuros que los bosques de latifoliadas. Esta combinación es útil para estudios de vegetación, monitoreo de patrones y drenaje de suelo y varios estados fenológicos de cultivos. Generalmente, tonos oscuros y brillantes de rojo indican vegetación de hoja ancha o vegetación saludable, mientras que los tonos más claros indican pasturas/sábanas o vegetación escasa. Áreas urbanas se observan en tonos claros de azul. Esta combinación de bandas da resultados parecidos a la fotografía infrarroja tradicional (Velásquez, 2018).

### ***2. Combinación R=3, G=2, B=1***

Es la combinación de “color natural”, las bandas visibles son utilizadas en esta combinación, los elementos en el suelo aparecen en colores similares a su apariencia en el sistema visual humano. La vegetación sana aparece verde, los campos recientemente aclarados aparecen muy claros, vegetación poco sana aparece color café o marrón y amarilla, los caminos son grises y las líneas de costa son blancas. Esta

combinación de bandas provee la mejor información acerca del agua (superficial y profunda), así como de los sedimentos.

Se usa para estudios urbanos. Áreas deforestadas o con vegetación escasa no son tan fáciles de detectar en esta combinación. También los diferentes tipos de vegetación son difíciles de distinguir a diferencia de otras combinaciones. La combinación no distingue bien entre agua profunda y suelo como otras combinaciones (Velásquez, 2018).

### **3. *Combinación R=4, G=5, B=3***

Esta combinación de las bandas NIR (4), (5) SWIR 1 y Red (3), ofrece una definición adicional de frontera agua-tierra y resalta detalles subyacentes no aparentes en las bandas del visible. Lagos internos y corrientes de agua pueden ser localizados con gran precisión cuando se utilizan las bandas del infrarrojo. Con esta combinación de bandas, el tipo de vegetación y su condición se muestran en variaciones de color (marrones, verdes y naranjas), así como en variaciones de tono. Es útil para análisis de suelo y condiciones de vegetación. Generalmente entre más húmedos estén los suelos más oscuros aparecen, debido a las propiedades de absorción del infrarrojo por el agua (Velásquez, 2018).

### **4. *Combinación R=6, G=5, B=4***

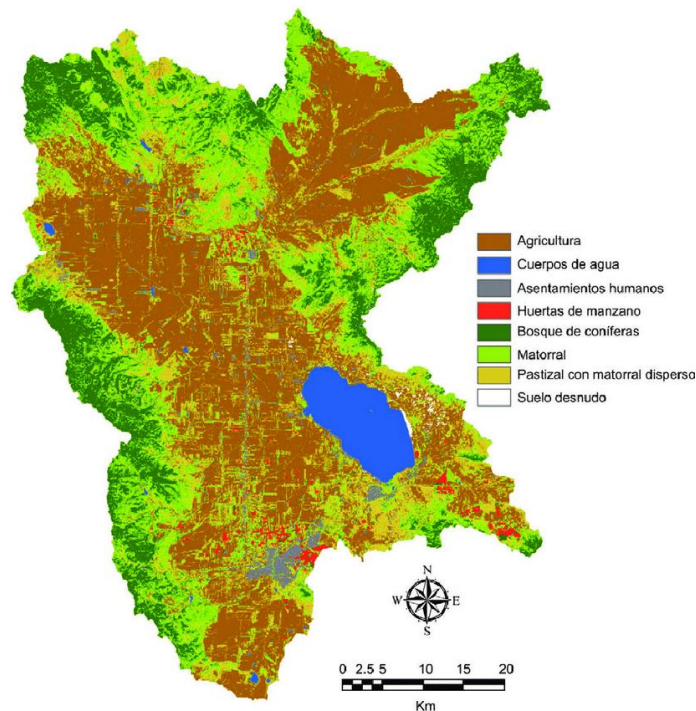
Provee una vista “parecida al natural”, mientras que permite la penetración en las partículas atmosféricas y el humo. La vegetación sana será en color verde brillante y se puede saturar en temporadas de alto crecimiento, las pasturas aparecen verdes, el suelo desnudo es rosado, los naranjas y marrones representan áreas con vegetación escasa. La vegetación seca será naranja y el agua será azul. Las arenas, suelos y minerales son resaltados en varios 48 colores. Esta combinación de bandas provee imágenes impactantes de áreas desérticas. Si se presentaran incendios en la imagen analizada estos aparecen en tonos rojizos (Velásquez, 2018).

## K. Clasificación de imágenes para la determinación de cobertura de suelo

La clasificación de imágenes para la cobertura de suelo se hace bajo el criterio de desagregación que se requiera para el trabajo pues esta definirá la unidad mínima de información que debe ser incluida en el mapa MIC. La leyenda usualmente no depende de la complejidad o tamaño del territorio, por lo que normalmente se utilizan leyendas particulares para cada zona de estudio. En la Figura 5 se ejemplifica este concepto, discriminando cada zona de estudio con un color específico (Chuvieco, 1996).

### Figura 5.

*Uso de imágenes satelitales para el análisis de cobertura de suelo*



*Nota.* Luis Carlos Alatorre (2014)

## L. Análisis visual de imágenes satelitales

Para realizar un análisis visual de las imágenes satelitales se requiere tener ciertos aspectos fundamentales: (i) soporte de la imagen, (ii) escala y (iii) combinación de bandas. Este último depende directamente del análisis de estudio específico (Chuvieco, 1996). Para la mayoría de las aplicaciones, según García (2007) se pueden considerar las siguientes características básicas:

1. **Tono:** hace referencia al brillo relativo de los objetos la cual está directamente relacionada con la cantidad de energía reflejada por la superficie.
2. **Color:** se diferencia del tono porque está es más sensible a las variaciones cromáticas versus la variación de intensidad luminosa por lo que es más ventajosa que el tono. Esta característica es posible mezclar varias bandas espectrales en una composición de color para la interpretación visual de las imágenes satelitales.
3. **Textura:** se refiere a la frecuencia con la que suceden los cambios tonales, es decir, entre los elementos que componen la imagen.
4. **Forma:** es la forma de su perímetro, la forma de los objetos.
5. **Tamaño:** se refiere al tamaño de los objetos en las imágenes, bajo el contexto de resolución espacial. Se considera también la escala en la que este impresa la imagen.
6. **Patrón:** la distribución especial de los objetos, como estos se repiten en formas en cada espacio.
7. **Sombras:** hace referencia a la oscuridad en un espacio debido a que los rayos de la fuente de energía no penetraron en esa parte, esto se debe por la interposición de un cuerpo opaco en un terreno o construcción.

8. **Localización:** se refiere a la posición geográfica en la que se encuentra un elemento respecto a un marco de referencia previamente establecido.
9. **Visión estereoscópica:** es la impresión de profundidad que se encuentran en el mundo real.
10. **Aspectos temporales:** se relaciona con los fenómenos naturales que son de importancia para la interpretación, pues factores como el crecimiento vegetativo y el contenido de humedad del suelo pueden variar a lo largo del año.

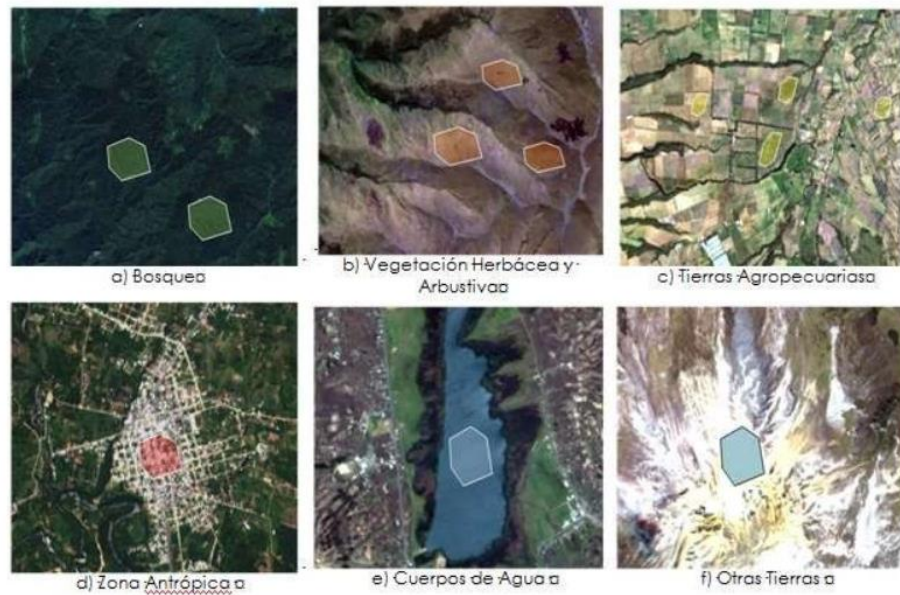
#### **M. Etapas de la clasificación supervisada de imágenes satelitales**

La clasificación supervisada de imágenes satelitales se puede definir como el proceso donde pixeles de identidad conocida, ubicadas dentro de la “zona de entrenamiento” son utilizados para clasificar aquellos pixeles de identidad desconocida. Este tipo de clasificación está dividida en las siguientes etapas. (Ordoñez hoyos y Serna Castaño, 2015).

1. **Etapa de entrenamiento:** Esta consiste en seleccionar áreas de identidad conocida de la cubierta de interés, por medio de rectángulos o polígonos cuyos datos sean almacenados digitalmente en la computadora generando así los datos de entrenamiento, tal como se muestra en la Figura 6.

## Figura 6.

*Etapa de entrenamiento*



*Nota.* Ingeoexpert (2014)

- 2. Selección del algoritmo de clasificación adecuado y clasificación:** Para esto el analista debe tener un conocimiento previo del terreno, ya sea por reconocimiento de campo, fotografías aéreas o mapas.
- 3. Operaciones de post clasificación:** Lo discutido anteriormente se realiza con el fin de asignar los píxeles de la escena a alguna clase, los algoritmos básicos para realizar esta tarea serán descritos a continuación.

## **N. Algoritmos para la clasificación de píxeles**

En el análisis de imágenes satelitales, los algoritmos para la clasificación de píxeles juegan un papel crucial en la interpretación y gestión de coberturas de suelo. Estos algoritmos procesan grandes volúmenes de datos, asignando etiquetas a cada píxel basándose en sus características espectrales y contextuales.

### ***1. Clasificador por mínima distancia***

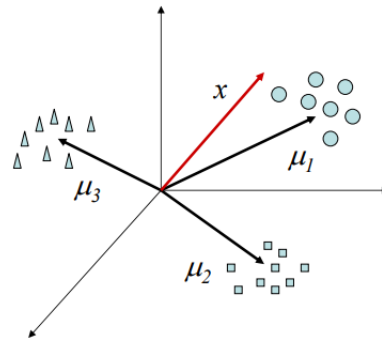
La clasificación por mínima distancia consiste en asignar a cada píxel la categoría cuyo centroide de clase esté más cercano, minimizando la distancia espectral calculada a partir de la comparación de los valores Normalizados de Diferencia (ND) entre el píxel y los centros de las distintas categorías. Este algoritmo es rápido y proporciona resultados efectivos en situaciones sin solapamiento entre clases, garantizando que ningún píxel quede sin clasificar. Durante el entrenamiento, se determina la media de las clases consideradas como regiones de interés. En la fase de clasificación, el programa asigna a cada píxel no identificado la clase cuya media está más cercana, utilizando usualmente la distancia euclidiana.

El método tiene la ventaja de garantizar que todos los píxeles se asignen a alguna de las clases. Sin embargo, su desventaja radica en ser paramétrico, lo que implica que no considera la variabilidad inherente a cada clase y puede propiciar clasificaciones incorrectas. Según (Chuvienco, 2006), este método de clasificación es de los más antiguos y actualmente se considera obsoleto, excepto para fines educativos.

No obstante, se incluye como un "clasificador ingenuo" para realizar comparaciones con otros métodos de clasificación, la Figura 7 ejemplifica como se calcula matemáticamente el método de clasificación por mínima distancia.

**Figura 7.**

*Clasificación por mínima distancia*



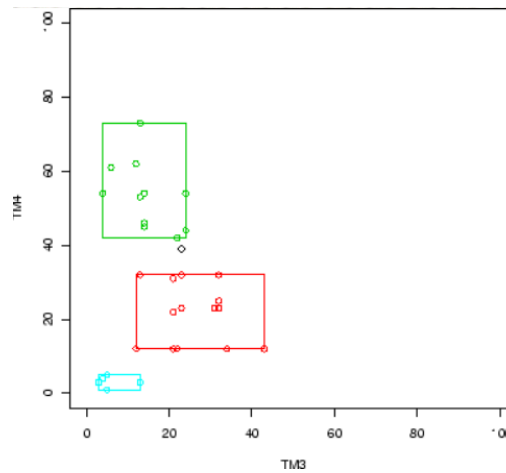
*Nota.* J.C. Gómez (2016)

**2. Clasificador por paralelepípedos**

Este clasificador define un subespacio en forma de paralelepípedo (hiperrectángulo) para cada clase, introduciendo sensibilidad a la varianza de las clases. Los límites de cada paralelepípedo se determinan por el rango de valores en cada área de entrenamiento, considerando un número específico de desviaciones estándar a ambos lados de la media del área. Aunque es rápido y fácil de implementar, presenta fuentes de error relacionadas con el solapamiento de paralelepípedos. La regla de decisión implica que un píxel desconocido debe caer dentro de alguno de los paralelepípedos para ser asignado a la correspondiente clase. Con este método pueden aparecer píxeles sin asignar o píxeles asignados a varias clases, la Figura 8 ejemplifica como se calcula matemáticamente el método de clasificación por paralelepípedos.

## Figura 8.

### *Clasificación por paralelepípedos*



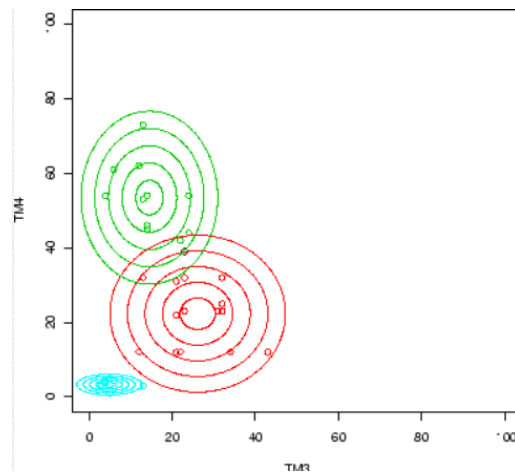
*Nota.* J.C. Gómez (2016)

### **3. Clasificador por máxima probabilidad**

Este método se basa en la premisa de que los valores de los elementos de cada clase siguen una distribución normal, lo que facilita la descripción de la categoría mediante una función de probabilidad utilizando el vector de medias y la matriz de varianza-covarianza. Aunque el clasificador de máxima probabilidad es el más complejo y requiere más cálculos, es ampliamente utilizado debido a su robustez y precisión. A diferencia de los clasificadores no paramétricos, este enfoque asume una distribución estadística específica para las clases. Los parámetros esenciales del modelo, como la media y la matriz de covarianza, se derivan de los datos de las áreas de entrenamiento, la Figura 9 ejemplifica como se calcula matemáticamente el método de clasificación por máxima probabilidad.

## Figura 9.

### *Clasificación por máxima probabilidad*



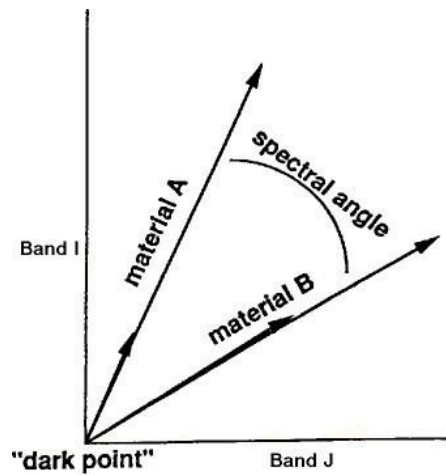
*Nota.* J.C. Gómez (2016)

#### **4. Clasificación mapeo de ángulo espectral**

Se trata de un algoritmo de clasificación que se basa físicamente en comparar la similitud espectral entre la reflectancia espectral de la imagen y los espectros de referencia. Estos espectros se consideran como vectores en un espacio con dimensionalidad igual al número de bandas. Este enfoque permite un mapeo rápido al calcular la similitud espectral entre los espectros de la imagen y los de referencia. A diferencia de otros métodos, evalúa cada píxel de la imagen con cada endmember [miembro final] para cada clase, asignándole un valor de ponderación entre 0 (baja similitud) y 1 (alta similitud), la Figura 10 ejemplifica como se calcula matemáticamente el método de clasificación por mapeo de ángulo espectral.

## Figura 10.

*Clasificación por mapeo de ángulo espectral*



*Nota.* Shareful Hassan (2009)

## O. Matriz de confusión

Para poder validar la producción de información útil obtenida de las imágenes satelitales es necesario tener procesos de control de calidad, sobre todo desde el punto de vista de la exactitud posicional o exactitud temática. La exactitud temática se define como “el grado de conformidad de una entidad de la leyenda respecto a la verdad del terreno” (Sánchez. 2016).

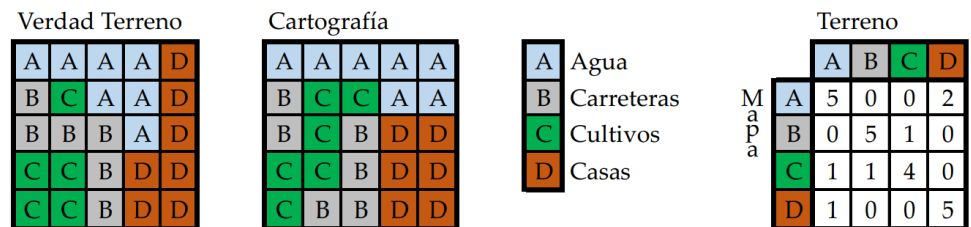
Para poder determinar la conformidad se requiere conocer la naturaleza de los posibles errores cometidos. Para eso se deben de hacer las siguientes preguntas: ¿Qué entidades se confunden?, ¿Probabilidad de que ocurran? ¿Pueden minimizarse? La herramienta para poder llevar a cabo esté análisis es la matriz de confusión.

La matriz de confusión se construye entonces a partir de las imágenes de satélite con N celdillas clasificadas en M clases. En las columnas se ordenan las clases reales (verdad-terreno), y en las filas se ordenan las unidades cartográficas (unidades o clases del mapa). Los elementos diagonales indican en número de clasificaciones realizadas correctamente y las que aparecen fuera de esta suponen migraciones o fugas. Los errores obtenidos en la matriz pueden ser por las siguientes razones:

1. **Errores de omisión** (*riesgos del usuario*): se refiere a elementos que perteneciendo a la clase analizada no aparecen en ella por estar erróneamente incluidos en otra. Estos aparecen como los datos por debajo de la diagonal principal de la matriz de confusión.
2. **Errores de comisión** (*riesgos del productor*): se refiere a los elementos que no perteneciendo a una clase aparecen en ella y estos se identifican como datos por encima de la diagonal principal de la matriz de confusión, en la Figura 11 se observa un ejemplo para el desarrollo de una matriz de confusión.

**Figura 11.**

*Obtención de matriz de confusión*



*Nota.* Sánchez (2016)

## **P. Fuentes de error en una clasificación temática**

Tras realizar una clasificación temática es común que se presenten con ciertos errores los cuales pueden ser distinguidos de la siguiente manera: (1) relacionadas con el terreno que se analiza, (2) con el nivel de precisión requerido en la leyenda, (3) con la adquisición de imágenes y (4) con factores medioambientales externos (Campbell, 1987; Chuvieco, 1996).

### **1. Estructura del terreno**

Estos errores suceden cuando ocurren confusiones derivadas de la disposición espacial del objeto de estudio. Es decir, de la forma en como estén orientadas y sobre todo el tamaño de las parcelas. Otro error común de este tipo sucede con la confusión entre cubiertas de techos vecinos, ya que es complicado para el equipo distinguir entre diferentes cubiertas de similares características debido a que el sensor detecta una señal radiométrico promedio entre 2 o más cubiertas, haciendo casi imposible su discriminación.

Este problema resulta ser especialmente sensible en zonas con una ocupación humana milenaria, como por ejemplo en la cuenca mediterránea, pues se hace complicado la aplicación de esta metodología en campos agrícolas. Este error, también llamado error de frontera puede afirmarse que es muy difícil de aclarar cuando este se aborda únicamente desde el valor radiométrico de cada píxel. Sin embargo, otros criterios más abstractos como la estructura, textura o asociación comunes en el análisis visual pueden ayudar a reducir este problema (Chuvieco, 1996).

La influencia del tipo de paisaje en los errores de clasificación ha dejado en evidencia la importancia de estudiar los patrones de error, pues se ha demostrado que existe una autocorrelación espacial significativa entre los píxeles mal clasificados. Es decir, la aparición de un píxel erróneo está fuertemente relacionado con su ubicación espacial. El error de frontera entonces resulta crucial pues aparecen más píxeles de borde en paisajes más complejos, como lo pueden ser áreas urbanas o espacios de vegetación mixta. (Congalton, 1988).

## ***2. Desagregación de la leyenda***

Este error se refiere a la inadecuada selección de las imágenes más apropiadas para su adquisición. En la mayoría de los casos este error se da tras realizar el intento de establecer subdivisiones en una clase temática, implicando problemas de asignación pues se pretende discriminar cubiertas muy similares espectralmente.

Este tipo de error es fácilmente detectable, pues al estudiar las confusiones más notorias detectadas en la clasificación, se puede detectar la mezcla entre subclases. En el escenario en que este sea el caso, se recomienda optar por categorías más generales, por métodos de interpretación más depurados o por información auxiliar que pueda tener el intérprete de las imágenes (Chuvieco, 1996).

### ***3. Adquisición de la imagen***

Estos hacen mención a problemas en el funcionamiento del sensor o plataforma, a la influencia atmosférica, fallos en el sistema de recepción y/o grabación de la imagen. En esta categoría también entran las confusiones derivadas de la incorrecta selección de la imagen. Pues dependiendo del tipo de análisis que se requiera hacer, es la época del año en la que se debe de seleccionar para la imagen. Por ejemplo, en el caso de cubiertas vegetales, se deben de considerar el dinamismo estacional. Si la fecha de la imagen no es correcta con el estudio, pueden aparecer errores de asignación, evitables con las imágenes de las fechas correctas.

### ***4. Condiciones medioambientales***

Se refieren a errores de asignación por factores medioambientales tales como: distinta orientación, pendiente, densidad y estado fenológico con la que aparece una cubierta. Esta dispersión dificulta la caracterización espectral de una clase, provocando confusiones con categorías vecinas, en la Figura 12 se muestra cómo se observa típicamente una imagen contaminada por nubosidad.

#### **Figura 12.**

*Fuente de error medioambiental por nubosidad*



*Nota.* USGS (2021)

## **Q. Gestión de riesgo de inundaciones**

La gestión del riesgo de inundaciones es un proceso integral que busca minimizar los impactos adversos de estos eventos naturales sobre comunidades y ecosistemas. Implica una combinación de estrategias preventivas, como la planificación territorial y la infraestructura de control de inundaciones, junto con medidas reactivas y de recuperación.

### ***1. Concepto de inundación***

Según (Nunez, 2017) una inundación consiste en la presencia de volúmenes de agua masivos en áreas no destinadas para su tránsito, ponen en riesgo la vida, bienes, infraestructura y sistema de producción tanto agrícolas como avícola. Las inundaciones se producen cuando hay un exceso de caudal que afecta la capacidad de transporte en canales de ríos, lagos, lagunas, reservorios, la red de drenaje, presas y otros cuerpos de agua. Estos eventos son fenómenos naturales y recurrentes que impactan tanto en áreas llanas como en zonas residenciales, especialmente cuando se registra un aumento en las precipitaciones. La Figura 13 ejemplifica una reciente inundación en la zona de estudio.

### **Figura 13.**

*Inundación en la Ribera del río Paz*



*Nota.* Prensa Libre (2022)

## **2. *Gestión de riesgo de las inundaciones:***

La gestión del riesgo de desastres se caracteriza de manera general como un proceso social que busca anticipar, reducir y controlar los elementos de riesgo de desastre dentro de la sociedad, alineado con el objetivo de promover un desarrollo humano, económico, ambiental, territorial y sostenible. (Narváez, Lavell y Pérez, 2009). Desde el punto de vista del análisis de riesgo de inundación se basa en la descomposición y estudio de cada uno de los elementos o partes integrantes del mismo, esto es, la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, para posteriormente proceder a integrar los mismos y tener una visión unificada del riesgo.

Los elementos considerados en una evaluación de riesgos variarán según el contexto y el entorno específico de la zona, así como el tipo de amenaza bajo estudio. Desde el punto de vista de las inundaciones, es necesario abordar los factores naturales, como la pendiente, el drenaje natural, el crecimiento urbano, la capacidad de drenaje, el uso del suelo, entre otros elementos.

### **R. Los SIG y la gestión del riesgo de inundaciones**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen diversas aplicaciones en el análisis y manejo del riesgo de inundaciones fluviales. Se utilizan para estudiar la peligrosidad, realizar la regionalización de datos de precipitación, obtener parámetros morfométricos y de la red, discretizar parámetros hidrológicos y delimitar áreas inundables, generando cartografías integradas de riesgo. Además, se aplican en medidas de mitigación predictivas, preventivas y correctivas, como la predicción meteorológica e hidrológica, la ordenación territorial, sistemas de aseguramiento, y planes de protección civil.

La conexión avanzada de los SIG con modelos hidrológicos, su integración con Internet, la reducción de costos y la disponibilidad de nuevas fuentes de información los convierten en herramientas esenciales para la gestión eficiente de este riesgo natural, ofreciendo ahorro de tiempo, esfuerzo y asegurando objetividad y precisión (Isidro et al., 2009).

### **Softwares SIG para la modelación de inundaciones.**

Existe una variedad de softwares de uso libre para la investigación y modelización hidráulica, cada uno con enfoques distintos según las necesidades que se requieran para la investigación. Algunos de los softwares más famosos son:

**TETIS:** El modelo TETIS ha sido desarrollado para realizar la simulación hidrológica en cuencas naturales, aunque dispone de submódulos para la simulación del efecto de embalses y del riego agrícola.

**EPANET:** Este programa de dominio público permite calcular complejas redes de abastecimiento y regadío, desde un punto de vista hidráulico y de calidad, ofreciendo una rápida capacidad de reacción.

**OpenFlows FLOOD:** Este programa del desarrollador Bentley utiliza modelos numéricos distribuidos espacialmente por completo para simular todos los procesos hidrológicos e hidráulicos que ocurren en las cuencas fluviales, incluidos la lluvia, la infiltración, el escurrimiento superficial, el flujo de canales y el flujo de agua subterránea. En zonas urbanas, OpenFlows FLOOD se puede conectar a un modelo generado por OpenFlows SewerGEMS para simular el flujo superficial y pluvial. Adicionalmente, el modelo se puede utilizar para simular inundaciones en áreas costeras debido a marejadas ciclónicas ((Chintana, s. f.).

**HEC-RAS:** Por sus siglas en inglés *Hydrological Engineering Center River Analysis System* [Centro de Ingeniería Hidrológica Sistema de Análisis de Ríos] puede ser utilizado como extensión en los diferentes programas de SIG como QGIS

o ARCGIS. es un programa de modelización hidráulica unidimensional compuesto por 4 tipos de análisis en ríos:

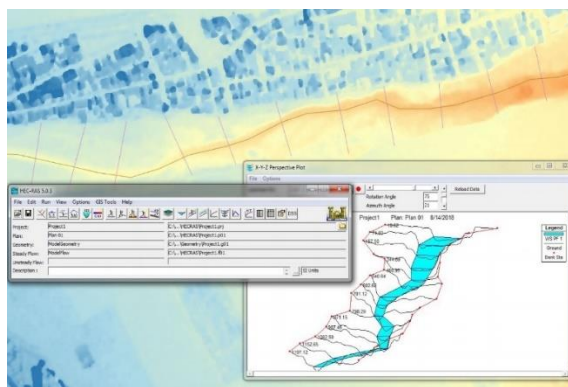
- Modelización de flujo en régimen permanente
- Modelización de flujo en régimen no permanente
- Modelización del transporte de sedimentos
- Análisis de calidad de aguas

Este software nos permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua, incluso podemos incluir en el modelo la existencia de obras hidráulicas como puentes, conducciones, presas, etc., por lo que su objetivo principal es realizar estudios de inundabilidad y determinar las zonas inundables.

El programa permite simular diferentes caudales y obras hidráulicas y permite obtener una gran variedad de (Polo, s. f.). La Figura 14 ejemplifica como es la interfaz del programa.

**Figura 14.**

*Programa Hec-Ras en Qgis*



*Nota.* Hatari Labs (2018)

## V. METODOLOGÍA

### A. Obtención de la cuenca

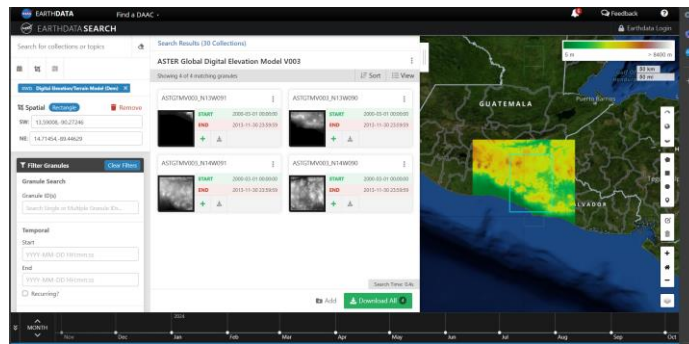
Para la realización de esta investigación se dividió la metodología en 2 partes siendo esta primera la obtención de la cuenca, esta se separó de esa manera debido a la diferencia en los procesos de obtención de estas sobre todo en el uso de los softwares.

#### *1. Obtención de los modelos digitales de elevación*

Los modelos de elevación digital (DEM) por sus siglas en inglés constituyen una representación tanto visual como matemática de las alturas en relación con el nivel medio del mar, facilitando así la descripción de las características topográficas y la identificación de elementos presentes en un área determinada. Este modelo se materializa en un archivo ráster de estructura regular, generado mediante el uso de equipos y software especializados en el ámbito computacional (INEGI, 2015). Los DEM requeridos para la zona de estudio del proyecto provienen de la base de datos: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> , la Figura 15 muestra la interfaz general del portal

**Figura 15.**

*Interfaz portal Earthdata*



*Nota. Elaboración propia*

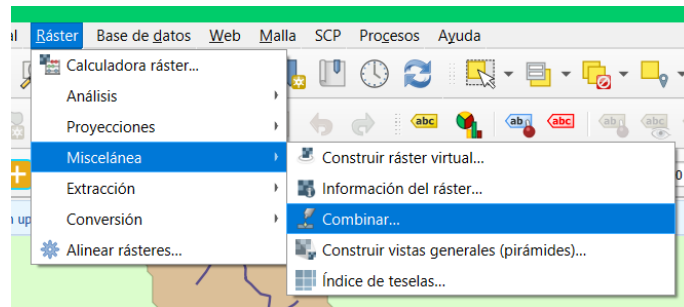
## **2. Unión de los DEM**

Debido a que el área de la cuenca de estudio está dividida entre 2 diferentes

imágenes DEM es necesario unir las para poder trabajar con la cuenca completa. Este procedimiento se hace a través del software QGIS 3.34.5 utilizando las herramientas de “ráster”- “Miscelánea”- “Combinar”. La Figura 16 y 17 muestran las rutas de acceso en el programa.

**Figura 16.**

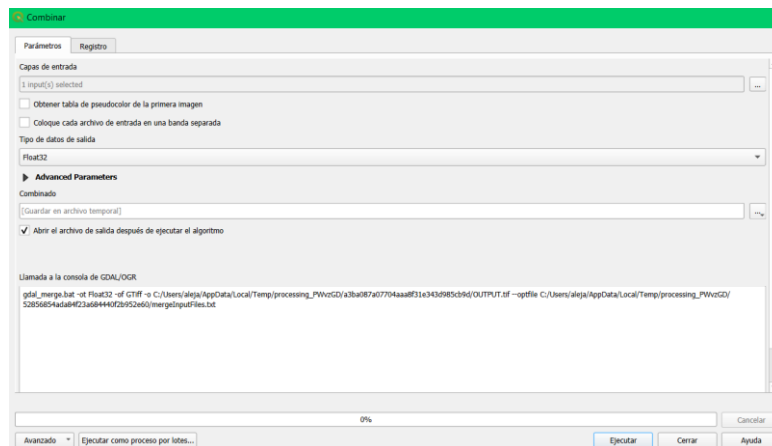
*Ruta de acceso a "combinar"*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 17.**

*Esquema general de la herramienta "combinar"*



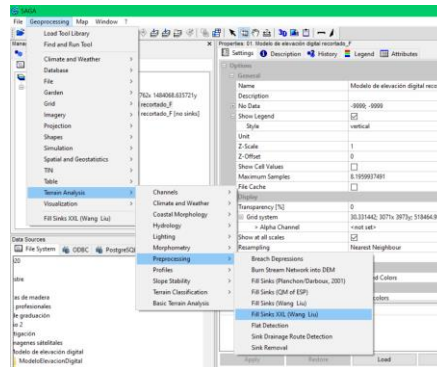
*Nota.* Elaboración propia

### **3. Obtención de la cuenca y ríos tributarios**

Para poder obtener el área de la cuenca por medio del DEM es necesario realizarlo en el programa SAGA GIS 9.2.0 el cual viene integrado con la instalación de la mayoría de las versiones del software QGIS. Dentro del programa se utilizará la herramienta *Fill Sinks Wang y Liu* [relleno de depresiones]. Este módulo utiliza un algoritmo propuesto por Wang y Liu para identificar y rellenar depresiones superficiales en modelos de elevación digitales. Este no sólo sirve para llenar las depresiones sino también para preservar una pendiente descendente a lo largo de la trayectoria del flujo, la ruta de acceso se muestra en la Figura 18 (Wichmann, 2007).

**Figura 18.**

*Ruta de acceso a "Fill Sinks"*

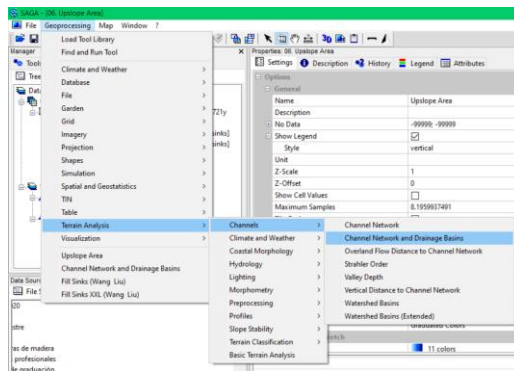


*Nota.* Elaboración propia

Una vez rellenadas las depresiones se procede a obtener los ríos tributarios de la cuenca, para esto se utiliza la herramienta de SAGA “Channel network and drainage basins” [Red de canales y cuencas hidrográficas], tal como se muestra en la Figura 19.

**Figura 19.**

*Ruta de acceso a "Channel network and drainage basins"*

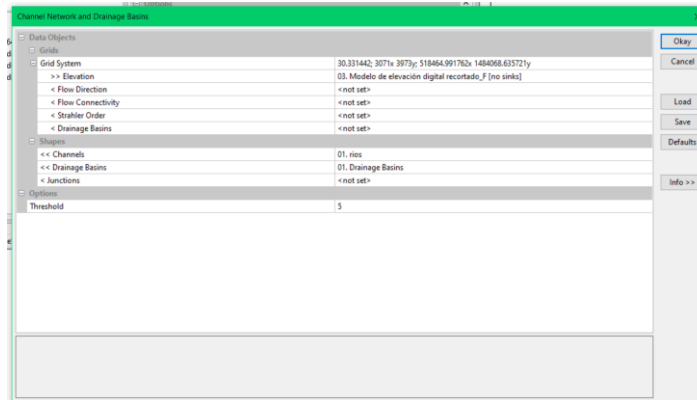


*Nota.* Elaboración propia

Dentro de la herramienta se coloca el modelo DEM sin depresiones y se pide al programa que se generen las categorías de “Channels” y “drainage basins”, la opción de “Treshold” hace referencia el nivel de detalle requerido para la obtención de los ríos tributarios, un valor de 1 hace referencia al máximo detalle posible en la obtención de ríos, para una cuenca grande como la de este proyecto se utilizó un valor de 6 lo cual significa un nivel de detalle medio. La vista general de la herramienta se muestra en la Figura 20.

**Figura 20.**

*Vista de la herramienta " Channel network and drainage basins"*

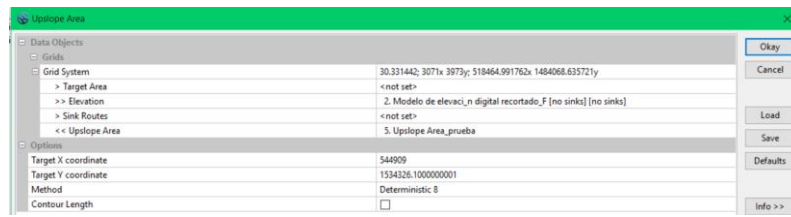


*Nota.* Elaboración propia

Al ejecutar la herramienta se generan todos los ríos tributarios y cuencas que aparezcan en el área del DEM procesado, por ello se debe de realizar la delimitación únicamente de la cuenca que se requiere para el proyecto. Esto se logra por medio de la herramienta *Upslope área* [zona cuenca arriba]. Para la obtención de la cuenca se toman las coordenadas de un punto de referencia donde se sabe que el río principal desemboca. La vista general de la herramienta se muestra en la Figura 21.

**Figura 21.**

*Vista de la herramienta "Upslope Area"*

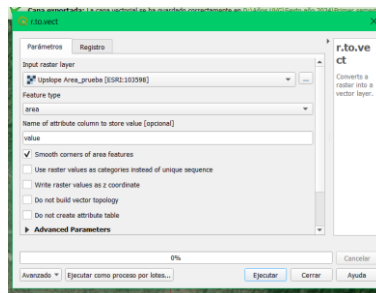


*Nota.* Elaboración propia

El archivo generado se guarda como geo.tif, para ser abierto nuevamente en Qgis, esto con el objetivo de convertir este archivo en uno tipo ráster, eso se realiza por medio del plugin de Grass "r.to.vect". En algunas veces es necesario realizarle una corrección de geometrías por medio de la herramienta "corregir geometrías" en la caja de herramienta de procesos.

**Figura 22.**

*Vista de la herramienta "r.to.vect"*



*Nota.* Elaboración propia

Finalmente se utiliza la herramienta de geo proceso "cortar" para delimitar los ríos dentro de la cuenca establecida. En la Figura 23 se muestra el producto final de esta sección.

**Figura 23.**

*Área y ríos tributarios de la cuenca*



*Nota.* Elaboración propia

Se destaca que, para esta cuenca en específico, se dificultó la obtención del cauce al final de la cuenca baja, pues al ser un territorio con tan poca pendiente por su cercanía al mar el programa no lograba tomar el cauce de manera correcta, por lo que ese último tramo se debió de editar manualmente y hacerlo coincidir con los shapes de ríos y las imágenes satelitales de Google Earth

**B. Elaboración de los mapas de cobertura de suelo**

Esta es la segunda sección de la metodología, en esta parte ya se engloba los pasos generales para la elaboración de los mapas de cobertura de suelo, esto en base a la información recabada con anterioridad.

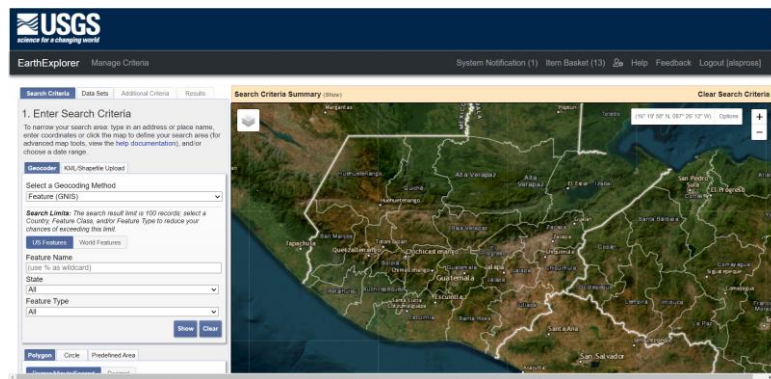
## 1. Obtención de las imágenes satelitales

La descarga de las imágenes satelitales proviene del sitio web: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Se utilizaron imágenes entre diciembre y febrero ya que son los meses donde hay menor contaminación visual por nubes. En la Figura 24 se observa la vista general del portal. Las imágenes recabadas pertenecen a las siguientes fechas:

- i. 29 de diciembre del 1999
- ii. 14 de enero del 2014
- iii. 24 de febrero del 2023

Figura 24.

Vista general del portal USGS

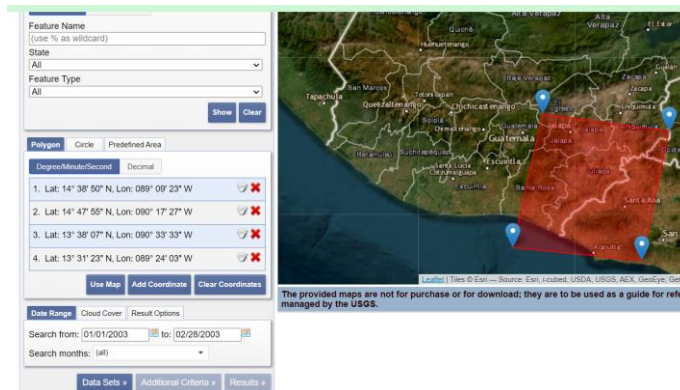


*Nota.* Elaboración propia

A continuación, se procede a delimitar el área de estudio por medio de un polígono de coordenadas, colocándolas de manera aproximada en el área de interés, adicionalmente se colocan datos de fechas de búsqueda y contenido de nubosidad de la imagen a buscar. La imagen 25 muestra cómo se seleccionó el área para esta investigación. La Figura 26 indica el tipo de colección de imágenes que se usó.

**Figura 25.**

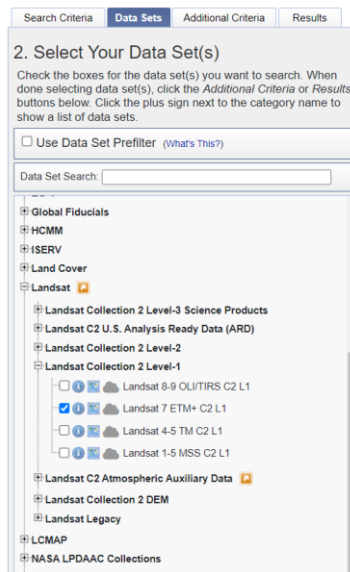
*Selección del área de interés en USGS*



*Nota. Elaboración propia*

**Figura 26.**

*Selección de la colección de imágenes*

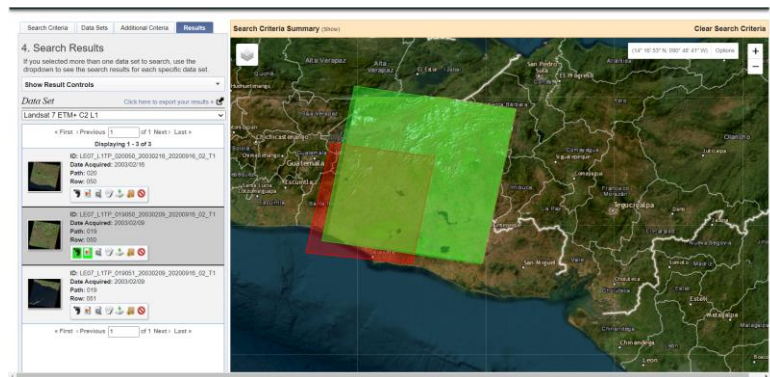


*Nota. Elaboración propia*

Finalmente se procede a seleccionar aquella imagen que cumpla el área de interés y que tenga la cobertura de nubosidad adecuada para el estudio. Se procede entonces a la descarga del paquete de datos, como se muestra en la Figura 27.

**Figura 27.**

*Selección de imágenes satelitales*

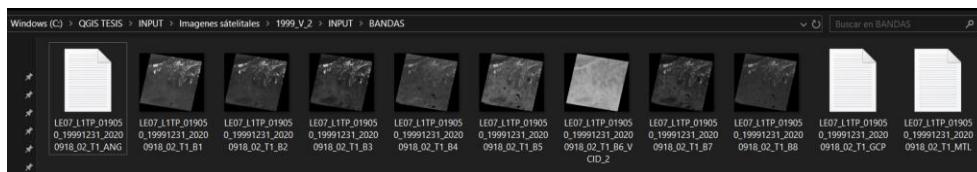


*Nota.* Elaboración propia

Se continua ahora con la carga de imágenes satelitales en el software de análisis QGIS. El primer paso para realizar consiste en la corrección radiométrica de las imágenes obtenidas. Tomar en consideración separar todas las bandas de la 1 a la 8, teniendo especial importancia en la 8 pues esta es la que contiene los metadatos en resolución 15x15 pixeles, información la cual será de gran utilidad en procesos posteriores. La imagen 28 muestra cómo se guardan las imágenes procesadas.

**Figura 28.**

*Carga de imágenes satelitales en QGIS*



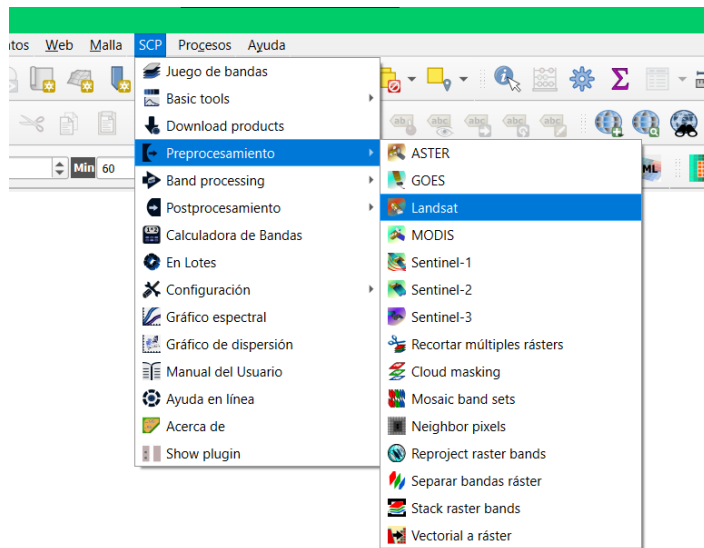
*Nota.* Elaboración propia

## 2. Preprocesamiento de imágenes satelitales

Una vez obtenidas las bandas satelitales requeridas se inicia con el preprocesamiento de estas por medio del plugin “Semi-automatic classification” (SCP) dentro del programa QGIS. Se selecciona el tipo de satélite requerido como se muestra en la siguiente en la Figura 29.

**Figura 29.**

*Ruta de acceso al plugin “Semi-automatic classification”*



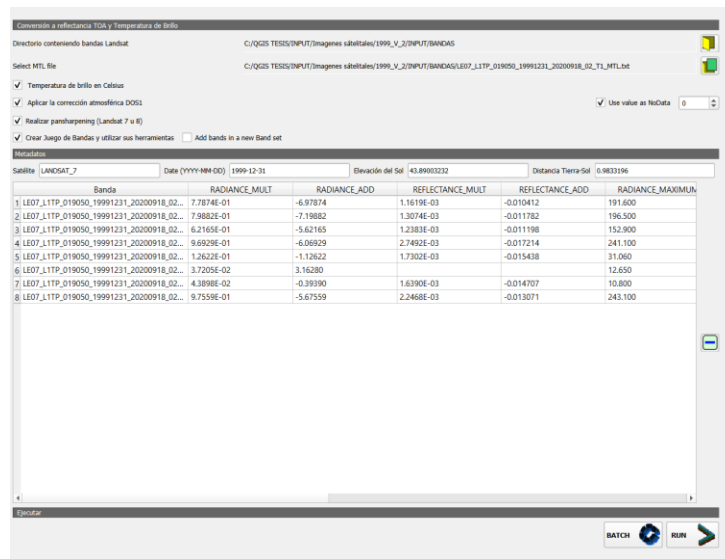
*Nota.* Elaboración propia

Dentro del plugin se seleccionan las bandas a procesar, así como los metadatos los cuales aparecen como archivos mtl.txt. Dentro de las opciones se seleccionan las casillas de temperatura de brillo en Celsius, corrección atmosférica DOS1 y Pansharpening.

La corrección DOS1 opera bajo la premisa de que dentro de las imágenes existen píxeles que se encuentran en completa penumbra, y que las radiancias detectadas por el satélite son resultado de la dispersión atmosférica (Congedo 2017). La corrección Pansharpening implica combinar una imagen multispectral de baja resolución con una imagen pancromática de alta resolución para obtener una imagen fusionada con una mayor resolución espacial y contenido espectral. La Figura 30 muestra cómo utilizar la herramienta “corrección atmosférica”.

**Figura 30.**

*Corrección atmosférica*

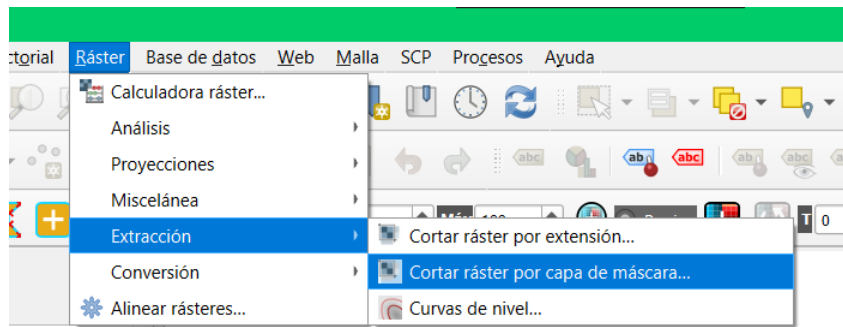


*Nota.* Elaboración propia

El siguiente proceso consiste en recortar el área de estudio específica, este se realizó con el archivo .shape previamente generado de la cuenca de interés. Para esto se utiliza la herramienta nativa de Qgis “Ráster”. La Figura 31 muestra la ruta de acceso a la herramienta.

**Figura 31.**

*Ruta de acceso para el corte de imágenes satelitales*









*Nota.* Elaboración propia

### **3. Creación de firmas espectrales**

Para la creación de firmas espectrales se requirió de la definición de macro clases, con el objetivo de englobar los usos de suelo más relevantes para el estudio. Estas macro clases fueron basadas en la información recabada de la determinación de cobertura vegetal y uso de la tierra en Guatemala actualizado por el MAGA en el año 2020. La división de macro clases se describe a continuación en Cuadro 3:

### Cuadro 3.

#### Definición de macro clases y categorías para las firmas espectrales

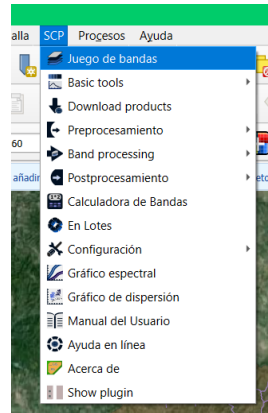
ID	Macro clase	Descripción	Referencia
1	Territorios artificializados	Esta categoría, contempla las áreas con construcciones dedicadas a viviendas o edificaciones que prestan servicios a la comunidad, se incluyen todas las obras de infraestructura creadas por el hombre que son necesarios para el bienestar de los habitantes.	
2	Territorios agrícolas	Esta categoría es la unión de 2 clases predominantes en el área de estudio siendo estas los cultivos anuales y permanentes. En esta clase se encuentran las áreas cultivadas de granos básicos, cultivos árboles y cultivos permanentes de plantas o tallos.	
3	Pastos	Esta categoría abarca las zonas que están vinculadas a la explotación ganadera y está constituida por los pastos cultivados y pastos naturales. Esta clase se separó de la categoría de territorios agrícolas por su gran extensión en el área de estudio.	
4	Vegetación arbustiva y/o herbácea	Comprende la vegetación arbustiva la cual hace referencia a Tierras con una combinación de plantas con tallo semileñosa y herbáceo que no sobrepasan los 5 metros de altura con hierbas y malezas de no más de 0.5 metros de altura.	
5	Bosques	Comprende las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Se engloban todas las	
6	Cuerpos de agua	Se incluyen en esta categoría los espejos de agua en reposo y en movimiento, entre estos los: ríos, lagos, lagunas y lagunetas.	

Fuente: elaboración propia

Una vez definidas las macro clases se procede a cargar las bandas tratadas en el plugin SCP, en el apartado “juego de bandas”. Se procede a colocar el tipo imágenes que se estarán procesado para que el programa le asigne los valores de longitud de onda adecuados como se muestra en la Figura 32 y 33.

**Figura 32.**

*Ruta de acceso a juego de bandas y vista general*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 33.**

Vista general del juego de bandas

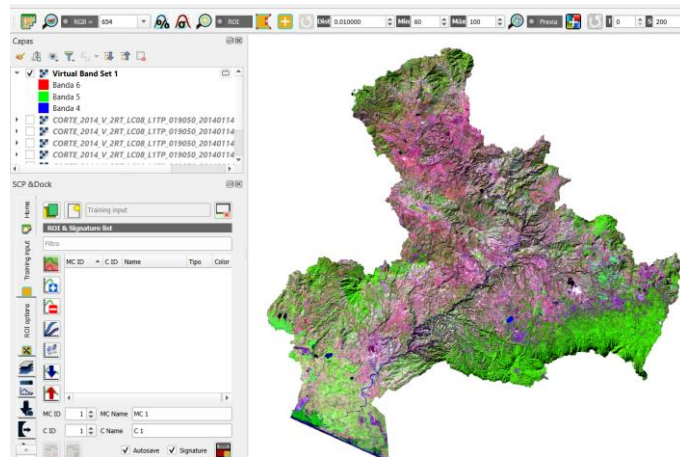
The image shows a screenshot of the 'Band set 1' window in the SCP software. It displays a table with 7 rows of band parameters. The columns are: 'Nombre de banda', 'Centro de longitud de onda', 'Factor Multiplicativo', 'Factor Aditivo', and 'Unidad de longitud de onda'. Below the table, there are dropdown menus for 'Wavelength' (set to 'µm (1 E-6m)'), 'Date' (set to '2020-01-01'), and 'quick settings' (set to 'Landsat 8 OLI [bands 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]').

	Nombre de banda	Centro de longitud de onda	Factor Multiplicativo	Factor Aditivo	Unidad de longitud de onda
1	CORTE_2014_V_2RT_LC08_L1TP_019050_20140114_20200912_02_T1_B1	0.44	1	0	µm (1 E-6m)
2	CORTE_2014_V_2RT_LC08_L1TP_019050_20140114_20200912_02_T1_B2	0.48	1	0	µm (1 E-6m)
3	CORTE_2014_V_2RT_LC08_L1TP_019050_20140114_20200912_02_T1_B3	0.56	1	0	µm (1 E-6m)
4	CORTE_2014_V_2RT_LC08_L1TP_019050_20140114_20200912_02_T1_B4	0.655	1	0	µm (1 E-6m)
5	CORTE_2014_V_2RT_LC08_L1TP_019050_20140114_20200912_02_T1_B5	0.865	1	0	µm (1 E-6m)
6	CORTE_2014_V_2RT_LC08_L1TP_019050_20140114_20200912_02_T1_B6	1.61	1	0	µm (1 E-6m)
7	CORTE_2014_V_2RT_LC08_L1TP_019050_20140114_20200912_02_T1_B7	2.2	1	0	µm (1 E-6m)

Posteriormente se abre el panel del plugin “SCP y DOCK” donde se creará una capa de ráster virtuales donde se puede variar el tipo de combinación de banda que se requiere analizar. Para el caso de esta investigación se utilizaron las combinaciones de Falso color urbano y falso color vegetativo con combinaciones de banda para Landsat 8 de 7-6-4 y 6-5-4 respectivamente. En la Figura 34 se muestra la combinación de bandas 7-6-4 y la vista general de la herramienta.

**Figura 34.**

*Vista general de la herramienta “SCP y DOCK”*

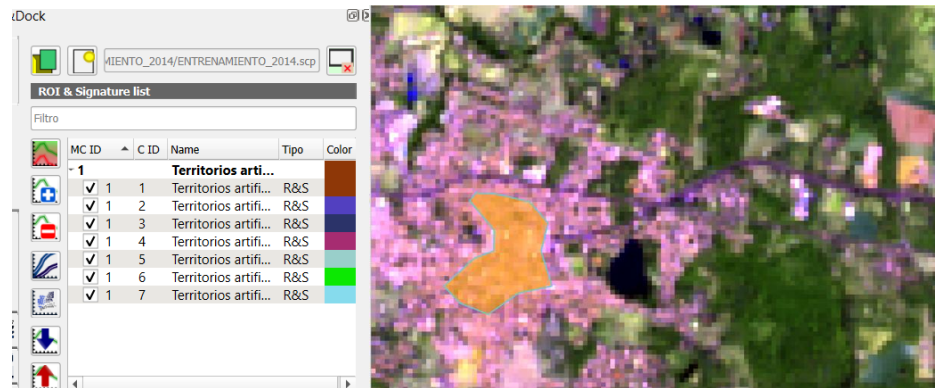


*Nota.* Elaboración propia

Luego se inicia con el entrenamiento de las macro clases definidas previamente, para esto es necesario realizar varios polígonos alrededor del área de interés, entrenado al programa para saber diferenciar los píxeles y asociarlos con las clases preestablecidas, en la Figura 35 se está colocando un polígono sobre un área urbana, en el apartado de la macro clase “territorios artificializados. Se recomienda un mínimo de 6 clases por macro clase, para asegurar una adecuada clasificación de píxeles por cada clase.

**Figura 35.**

*Entrenamiento de las macro clases*

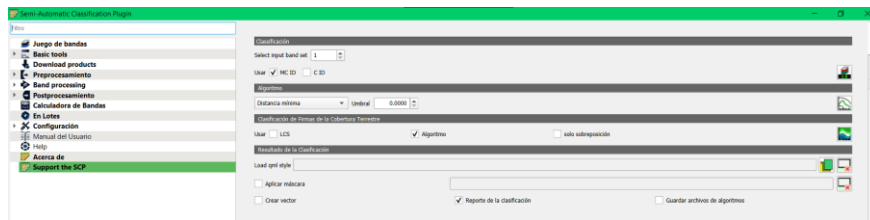


*Nota.* Elaboración propia

Tras completado el entrenamiento todas las capas de interés se procede a seleccionar dentro de las herramientas del plugin SCP el apartado “Band processing” se selecciona la opción “classification” en ella se coloca en base que se quiere clasificar que en este caso son las macro clases previamente creadas. En la Figura 36 se muestra la configuración usada para este trabajo. En la Figura 37 se muestra el producto final obtenido tras la primea clasificación

**Figura 36.**

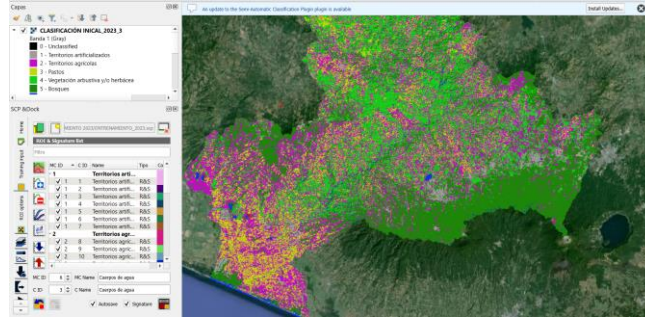
Vista general de la herramienta " Band processing "



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 37.**

Clasificación preliminar



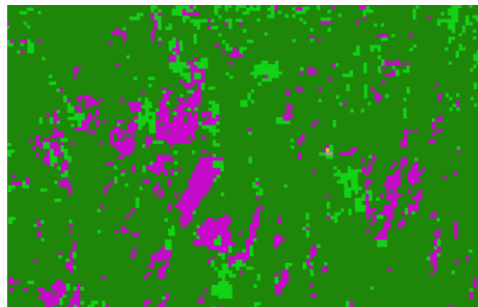
*Nota.* Elaboración propia

#### **4. Post-procesamiento**

Para realizar las correcciones de post-procesamiento a las clasificaciones obtenidas se utiliza nuevamente en software SAGA GIS, esta vez utilizando su herramienta “Majority/Minority filter,” el cual realiza una limpieza de píxeles aislados y entrega un resultado más homogéneo en las macro clases creadas. La Figura 38 compara el uso de la herramienta antes del uso de la herramienta, la Figura 39 muestra el producto tras utilizar la herramienta.

**Figura 38.**

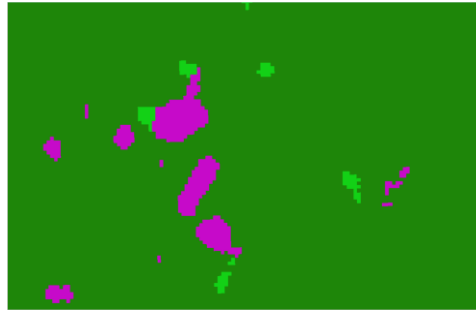
*Comparativa clasificación sin majority filter*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 39.**

*Clasificación con majority filter*



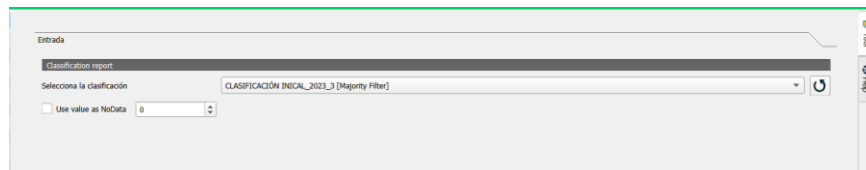
*Nota.* Elaboración propia

**5. Obtención de resultados**

Para poder cuantificar el cambio de superficie en los diferentes usos de suelo se utiliza la herramienta de “obtención de resultados” en el aparato de “post-procesamiento” del plugin SCP. El archivo se exporta con el tipo exel.txt, es decir delimitado por comas, por lo que se debe hacer el procedimiento previo para convertirlo a un documento de texto. En la Figura 40 se muestra el uso de la herramienta.

**Figura 40.**

*Vista general de la herramienta "obtención de resultados"*



*Nota.* Elaboración propia

## 6. Precisión de la clasificación

Para poder verificar la precisión de la información se utilizó la herramienta de precisión dentro del apartado de procesamiento, esta herramienta compara la clasificación obtenida con las capas de entrenamiento que se realizaron previamente. Este arroja como resultados el coeficiente Kappa, la precisión del usuario y la precisión del productor, así como un indicador general de la precisión total de la clasificación realizada. En la Figura 41 se muestra el uso de la herramienta, en la Figura 42 se observa como el programa arroja los datos crudos.

**Figura 41.**

*Vista general de la herramienta “obtención de resultados”*



*Nota. Elaboración propia*

**Figura 42.**

*Resultados preliminares de la herramienta “obtención de resultados”*

-> ERROR MATRIX (pixel count)								
-> Referencia								
V_Classified	-999	1	2	3	4	5	6	7
-999	0	0	0	0	0	0	0	138923
1	0	325801	7	0	12	0	0	0
2	0	462572	280	33	20	25	0	0
3	0	835523	12	1841	1	15	0	0
4	0	798102	10	7	479	16	0	0
5	0	77712	4	0	25	2108	0	0
6	0	49420	0	0	0	187	258	0
7	0	2	0	27	0	0	0	352
Total	0	2785322	322	1908	547	2361	259	139275
-> AREA BASED ERROR MATRIX								
-> Referencia								
V_Classified	-999	1	2	3	4	5	6	7
-999	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3353
1	0.0000	0.0214	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0667	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0242	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.1282	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.1196	0.0000	0.0000	0.0000	0.0022	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0119	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0001	0.0000	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003
Total	0.0000	0.4368	0.0001	0.0009	0.0001	0.0033	0.0000	0.3396
Area	0	2554918837	236665	3194390	795948	18272566	276461	128159625
SE	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001
SE area	0	466237	24808	779890	48883	408990	17121	805617
95% CI area	0	917803	46624	1539064	97771	801621	23621	1579009
PA (%)	nan	4.8969	84.1328	18.4364	63.3968	98.6670	100.0000	1.8674
UA (%)	0.0000	99.3964	0.0296	0.2198	0.0000	2.0400	0.3632	62.3885
Kappa hat	0.0000	0.9999	0.0005	0.0013	0.0005	0.0232	0.0039	0.8272

*Nota. Elaboración propia*

## VI. RESULTADOS

### A. Morfometría de la cuenca

Según la información recabada por medio del modelo de elevación digital se determinó que la elevación máxima de la cuenca se encuentra a 2,362 msnm, la media es de 852.5 msnm y la baja corresponde a 0 msnm puesto que la cuenca desemboca en el océano Pacífico. La cuenca fluye con dirección sur con un área de: 2632.61  $km^2$ , un perímetro de 411.39 km y un ancho medio de 23.30 km.

La cuenca tiene una pendiente media de 21.83 grados clasificándola como una cuenca con pendiente muy alta, esto se debe también a la existencia puntos de gran altitud en la cuenca, formaciones geológicas como el volcán Moyuta y su contraste con la cuenca baja que desemboca en el océano pacífico, a nivel del mar.

La longitud del cauce, la cual hace referencia a la distancia entre el punto de desfogue y el punto más alejado de la cuenca, es aproximadamente 112.94 km; el valor máximo de altitud en el punto más alejado del cauce principal es de 1535 msnm, el punto más bajo se encuentra en su desembocadura en el océano pacífico, con una elevación de 0 msnm, teniendo entonces una pendiente media del cauce del 13.59 %

La pendiente media del cauce sirve como una aproximación de la pendiente principal del río, pero no representa la realidad del cauce por segmentos, para ello es necesario realizar otros estudios más precisos como una pendiente ponderada, por ello, se realizó una aproximación del perfil de elevación del cauce principal, por medio de su análisis en Google Earth, el perfil de elevación obtenido se muestra en la Figura 43.

**Figura 43.**

*Perfil de elevación del cauce principal*



*Nota.* Elaboración propia

A través del perfil de elevación obtenido se puede hacer la aproximación de una pendiente media ponderada siendo está de 1.4%, esto hace referencia a una pendiente moderada típico en los ríos de transición entre zona montañosa y llanuras. Se observa como al inicio del cauce se tiene una pendiente mucho más elevada, que se va estabilizando hasta acercarse a una pendiente mínima con la zona cercana a su desembocadura con el océano pacífico (MINAMBIENTE, 2017).

Por medio de las ecuaciones descritas en el marco teórico se obtuvo que la densidad de drenaje ( $D_d$ ) es de  $0.41 \text{ km}/\text{km}^2$ , el factor de forma ( $F$ ) es 0.20 y el índice de compacidad ( $K$ ) es de 2.26.

$$D_d = \frac{N_s}{A} = \frac{1083.02 \text{ km}}{2632.61 \text{ km}^2} = 0.41$$

$$F = \frac{A}{L^2} = \frac{2632.61 \text{ km}^2}{(112.94 \text{ km})^2} = 0.20$$

$$K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.282 * \frac{411.39 \text{ km}}{\sqrt{2632.61 \text{ km}^2}} = 2.26$$

La densidad de drenaje obtenida hace referencia a que la cuenca es medianamente bien drenada pues el valor obtenido se acerca a  $0.5 \text{ km}/\text{km}^2$ , el cual es el valor medio para una cuenca de esta categoría. El factor de forma entra en la categoría de “ligeramente achatada”, lo que indica que la cuenca no tiende a ser circular sino alargada, esto provoca que no sea propensa a presentar crecidas súbitas cuando se presentan lluvias intensas en gran parte de su superficie. El índice de compacidad entra en la categoría de oval oblonga a rectangular oblonga, lo cual indica que la concentración de agua es más uniforme en el tiempo, generando entonces que la cuenca se inunde más lento.

En general la cuenca presenta valores que corresponden a una cuenca bien drenada y con características adecuadas para la gestión de crecidas repentinas por lo que la persistencia de las inundaciones en la cuenca baja en la temporada lluviosa indica que la cuenca presenta algún tipo de deterioro ambiental puesto que naturalmente no debería de sufrir las crecidas que ha tenido en los últimos años.

## **B. Resultados de cambio de cobertura de suelo entre 1999-2014 y 2014-2023**

Para el año 1999, se observa que la mayoría del área de la cuenca se encuentra catalogada en la clase de vegetación arbustiva, teniendo también una distribución equilibrada de la categoría de pastos y bosques. Se observa también la poca presencia de territorios artificializados y de territorios agrícolas, lo que da incidencia a que en este periodo la ocupación mayoritaria de la cuenca era para el uso de pastos para la producción vacuna, así como una gran cantidad de área sin utilización específica. En el Cuadro 4 se exponen los resultados obtenidos para esta clasificación.

#### Cuadro 4.

*Cobertura de suelo entre los años 1999, 2014 y 2023*

Cambio de uso de suelos						
CLASE	1999		2014		2023	
	Área(km2)	%	Área(km2)	%	Área(km2)	%
<b>Territorios artificializados</b>	107.23	11.04	133.70	11.46	83.12	10.60
<b>Territorios agrícolas</b>	174.64	12.19	252.26	15.75	389.72	15.83
<b>Pastos</b>	537.33	18.37	210.23	12.77	754.49	22.05
<b>Vegetación arbustiva y/o herbácea</b>	1198.89	29.65	1417.84	33.36	859.72	23.84
<b>Bosques</b>	580.78	19.11	600.04	17.14	537.24	18.34
<b>Cuerpos de agua</b>	24.22	9.63	19.86	9.52	8.71	9.33

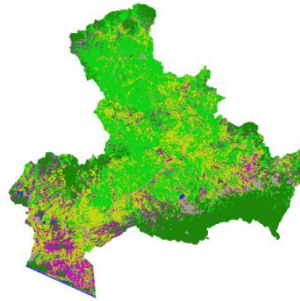
*Nota.* Elaboración propia

Para el año 2014, se observa un ligero aumento en la cobertura de bosques, aproximadamente un área de 20 km cuadrados de bosque. Los territorios agrícolas también aumentaron significativamente, aumentando un 4% área respecto al año anterior. El aumento de esta clase significó la disminución del área destinada a pastos, sobre todo en la parte baja de la cuenca, pues se observa una rotación de actividad de agraria a agrícola.

En el año 2023, se observa una caída de en la categoría de bosques, infiriendo que la cobertura se volvió a perder debido a la mala gestión ambiental de los bosques en ambos países. Se observa también un decrecimiento en la categoría de territorios artificializados, esto es un indicativo de que la clasificación no se realizó de la manera correcta, pues no es lógico que la mancha urbana pueda haber retrocedido en un periodo de 10 años en el futuro, dado que la población ha ido en aumento durante ese periodo de tiempo. Las Figuras 44-46 corresponden a las 3 clasificaciones realizadas en los años discutidos en esta investigación.

**Figura 44.**

*Imagen clasificada 2023*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 45.**

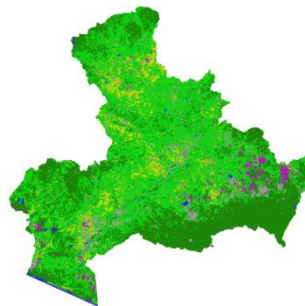
*Imagen clasificada 2014*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 46.**

*Imagen clasificada 1999*



*Nota.* Elaboración propia

### **C. Validación de la información obtenida**

Para llevar a cabo las clasificaciones de manera precisa, es fundamental verificar la información recopilada. Esto implica asegurar la exactitud del proceso de clasificación, aunque es importante tener en cuenta que ninguna clasificación, independientemente de su tipo, puede garantizar un 100% de precisión. La confiabilidad de los resultados está estrechamente relacionada con esta precisión. Al desarrollar una matriz de error, las columnas representan lo observado en los lugares de referencia, mientras que las filas representan las clasificaciones realizadas en función de estos lugares de referencia.

Para poder discutir los resultados de precisión, es necesario conocer la precisión de productor (PA), así como la precisión de usuario (UA). La primera se puede definir como una medida de que tan correctamente el modelo de entrenamiento generado clasificaría los píxeles en base a la información con la que se creó, el segundo representa la probabilidad de que un píxel clasificado en una categoría determinada realmente represente esa categoría en el terreno. La precisión del usuario es la más importante pues es la que evalúa que tan precisa es la representación del mapa según la clase evaluada (Lund University, s. f.).

El otro parámetro importante para la evaluación de precisión en una clasificación supervisada es el indicador de precisión global, este se calcula por medio de la división de los píxeles clasificados correctamente, es decir la diagonal de la matriz de confusión, entre el total de píxeles en la imagen. A continuación, el Cuadro 5 presenta la matriz de error calculada para el año 2023, pues era el año que se podía verificar adecuadamente con las imágenes satelitales más recientes de Google Earth, además de compararlo con el archivo .shp sobre la clasificación de uso de suelos realizada en el año 2020, por el MAGA.

### Cuadro 5

*Matriz de error para el año 2023*

MACRO-CLASE	REFERENCIA						TOTAL	% USUARIO
	1	2	3	4	5	6		
<b>1</b>	530495	40	0	0	0	0	530535	99.99
<b>2</b>	821409	1197	35	50	108	0	822799	0.15
<b>3</b>	869603	90	453	268	3	0	870417	0.05
<b>4</b>	583859	3	77	1645	13	0	585597	0.28
<b>5</b>	9812	123	0	61	7581	0	17577	43.13
<b>6</b>	0	1	0	0	0	109	110	99.09
<b>TOTAL</b>	2815178	1454	565	2024	7705	109	2827035	
<b>% PRODUCTOR</b>	18.84	82.32	80.18	81.27	98.39	100.00		

*Nota.* Elaboración propia

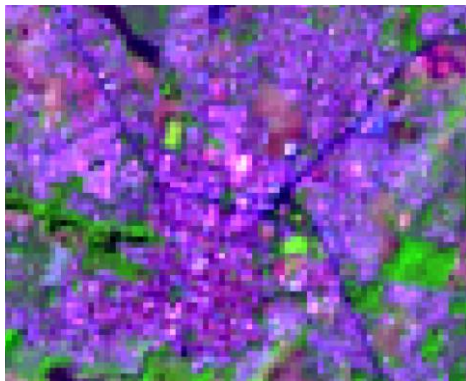
Para la clasificación del año 2023 se tuvo una precisión general del 19.5 % valor totalmente inadecuado para una clasificación correcta, en la matriz se puede observar que para la clasificación 1 la cual pertenece a territorios artificializados hubo una gran confusión en la clasificación de píxeles, sobre todo con la clase 2 y 3 las cuales corresponden a la clase de territorios agrícolas y pastos respectivamente. La gran mayoría de píxeles mal clasificados se encuentran debajo de la diagonal de la matriz de confusión, esto hace referencia a elementos que perteneciendo a la clase analizada no aparecen en ella por estar erróneamente incluidos en otra (Sánchez, 2016).

Se destaca que el error de productor para la clase 1 es del 18.84 % esto quiere decir que el modelo creado para la identificación de esta clase no fue realizado de manera correcta y por ende genera la confusión de píxeles con las demás clases. El resto de macro clases tienen un porcentaje de productor relativamente alto lo que indica que el entrenamiento fue realizado de manera adecuada. Por consiguiente, debido a la confusión generada por la clase 1, las clases 2, 3 y 4 tuvieron pésimos valores de precisión del usuario lo cual se traduce en una muy mala representación de estas clases en el mapa clasificado.

Para poder analizar por qué la macro clase 1 tuvo tan mal desempeño en la clasificación fue necesario analizar las firmas espectrales que contenía esta categoría. Se puede observar que existe una gran similitud entre las firmas de las clases mencionadas, el error se hace todavía más evidente cuando se comparan territorios urbanizados (Figura 47) con territorios agrícolas no sembrados (Figura 48). Se observa también la similitud entre las firmas espectrales, como se muestra en la Figura 49.

**Figura 47.**

*Territorios artificializados*



*Nota.* Elaboración propia

|

**Figura 48.**

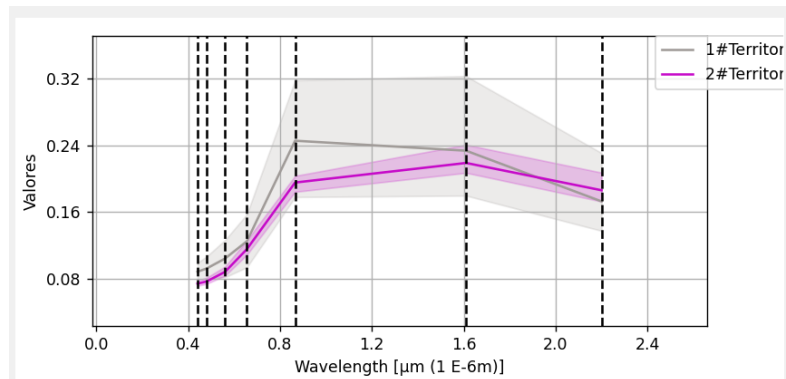
*Territorios agrícolas*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 49.**

Comparación de las firmas espectrales



*Nota.* Elaboración propia

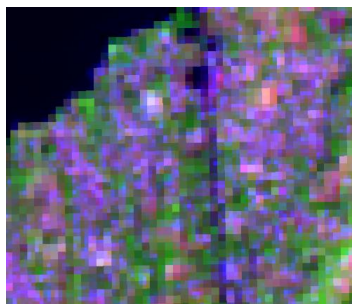
Este tipo de error de clasificación se repite en la gran mayoría de clases, pues al tener un territorio tan diversificado en los usos de suelo, radica una tarea casi imposible el realizar una adecuada clasificación de los usos de suelo utilizando el actual método. Además, otra característica que contribuyó al error entre clase 1 y las demás fue que la mayoría de las zonas urbanas de la cuenca no se encuentran densamente pobladas, pues su uso de suelo se alterna entre vegetación arbustiva, e incluso bosque. Esto dificulta

al algoritmo del programa identificar adecuadamente una firma espectral específica para los territorios artificializados provocando en gran medida, los porcentajes de error discutidos anteriormente.

En las Figuras 50-51 se observa una sección de la cabecera municipal de Ahuachapán, en el Salvador. Esta es una de las áreas urbanas más grandes de la cuenca; la imagen 50 corresponde a como se interpreta el área urbana con las imágenes satelitales y la 51, como se ve en realidad por medio de las imágenes de alta resolución de Google Earth. Se puede observar que, al ser un área de uso de suelo tan variada, al realizar la clasificación, los pixeles resultantes no representan de manera correcta el uso de suelo (figura 52).

**Figura 50.**

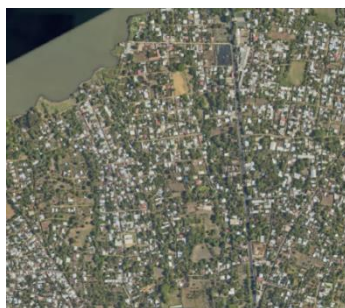
*Territorios artificializados con imágenes Landsat*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 51.**

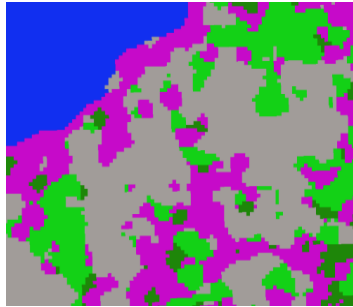
*Territorios artificializados con imagen de Google Earth*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 52.**

*Territorios artificializados tras realizar la clasificación de macro clases*



*Nota.* Elaboración propia

Las clases de bosque, vegetación arbustiva y agua si tuvieron un mejor desempeño representando de manera más adecuada los pixeles clasificados con la realidad del terreno, pues en el caso de bosques y cuerpos de agua tenían firmas espectrales más marcadas, haciendo más sencilla su adecuada identificación. La Figura 53 ejemplifica la zona de cobertura manglar en la parte baja de la cuenca, en la imagen 54 se puede observar cómo se ha perdido la cobertura vegetal en el manglar frente al crecimiento en los territorios agrícolas, lo cual coincide con la realidad de la imagen.

**Figura 53.**

*Zona de manglar en la parte baja de la cuenca*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 54.**

*Zona de manglar tras realizada la clasificación*



*Nota.* Elaboración propia

Debido a la inexactitud del método de clasificación realizado se decidió realizar nuevamente la clasificación, esta vez omitiendo las clases con mayor confusión esto con el objetivo de optarse por una leyenda simplificada, que reduzca las confusiones entre categorías de transición. (Chuvieco, 1995, p.391)

Como se puede observar en el Cuadro 6, la macro clase suprimida fue la 1. pues esta era la que mayor confusión generó en la clasificación anterior. Además, se descartó también la macro clase 4 la cual tenía mucha confusión con la macro clase 2, sobre todo por la fecha cuando fueron adquiridas las imágenes las cuales coinciden con la época seca, provocando que los suelos agrícolas en preparación de siembra se confundieran con pastos para uso de ganadería. Para realizar este nuevo estudio se realizó bajo la misma metodología que la clasificación anterior, utilizando como guía los usos de suelo del MAGA 2020 y las imágenes satelitales 2023.

## Cuadro 6.

### Reclasificación de uso de suelos

Cambio de uso de suelos						
CLASE	1999		2014		2023	
	Área (km2)	%	Área (km2)	%	Área (km2)	%
<b>Territorios agrícolas</b>	413.78	20.87	768.05	26.86	1070.29	32.01
<b>Vegetación arbustiva y/o herbácea</b>	1465.57	38.79	1381.49	37.31	1054.92	31.75
<b>Bosques</b>	725.86	26.19	475.15	21.87	495.35	22.21
<b>Cuerpos de agua</b>	19.58	14.15	10.72	13.96	14.99	14.03

*Nota.* Elaboración propia

La reclasificación con menos macro clases arrojó resultados de distribución de uso de suelos más lógicos, pues se observa el aumento exponencial de los territorios agrícolas con cada año que pasa. También se observa una disminución gradual en la cobertura forestal entre los años 1999 y 2014, con un ligero aumento en el año 2023. Se calculó también la matriz de error para el año 2023 la cual arrojó resultados positivos en cuanto a su exactitud. Esta se muestra en el Cuadro 7.

## Cuadro 7.

### Matriz de error clasificación 2023

MACROCLASE	2	4	5	6	Total	% USUARIO
2	8251085	0	23	0	8251108	0.99
4	47435	70	0	0	47505	0.15
5	5	0	714	0	719	0.99
6	0	0	0	238	238	1.00
TOTAL	8298525	70	737	238	8299570	1.00
% PRODUCTOR	0.87	1.00	0.97	1.00		

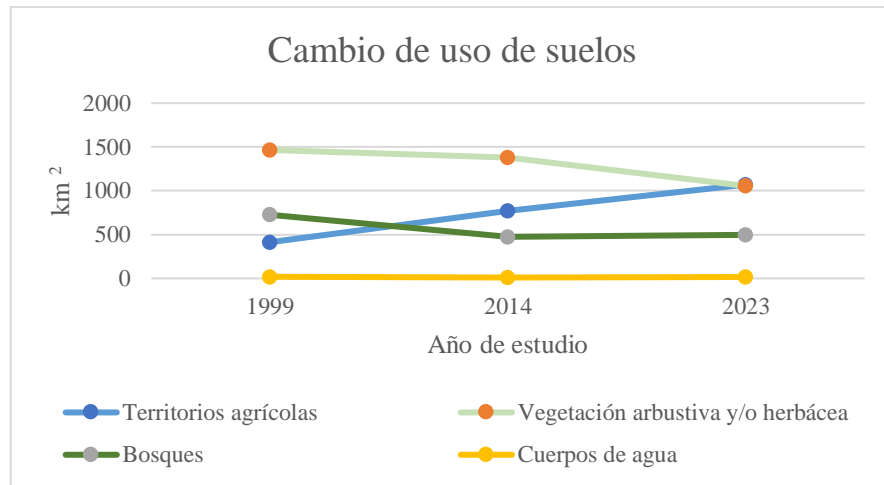
*Nota.* Elaboración propia

Para la matriz de error del año 2023 se tuvo una precisión del 96.43 % valor que corresponde a una clasificación bien realizada. Este resultado es evidenciado en la matriz de error donde se observa que en su mayoría los pixeles se clasificaron en la clase donde pertenecían. Únicamente se destaca que hubo una pequeña confusión entre la macro clase 2 y 4, pues probablemente algunos territorios de naturaleza agrícola en su fase de plantación se parecen al territorio arbustivo, por ende, pudo afectar de cierta

manera la precisión de usuario de esta macro clase. En el Cuadro 8 se observa de mejor manera el cambio entre los usos de suelo en los años analizados.

### Cuadro 8.

*Evolución del cambio de uso de suelos*

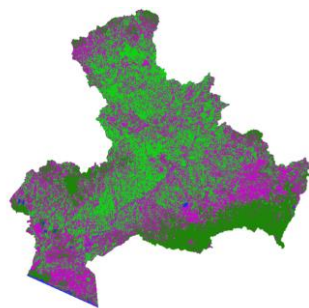


*Nota.* Elaboración propia

Se destaca que a pesar de que estos resultados parezcan muy exactos, esto se debe a que se tuvo que discriminar clases reales en el mapa, dando como consecuencia que las clases de territorios artificializados y pastos sean mezcladas en las categorías restantes. El resultado de esta clasificación se observa en la Figura 55. Para realizar un trabajo más profundo es necesario realizar otro tipo de análisis auxiliares para mejorar la calidad de un trabajo investigativo de esta índole.

**Figura 55.**

*Clasificación 2023 con menos macro clases*



*Nota.* Elaboración propia

## VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### A. Análisis de cambios de cobertura de suelo en el periodo de 1999-2014

Para el periodo del año 1999 a 2014 se observa que la categoría de mayor cambio fue la de territorios agrícolas teniendo un aumento de 354 km cuadrados o un equivalente a 5.99 % entre los años mencionados. En el Cuadro 9 se exponen los valores obtenidos para este intervalo de tiempo

#### Cuadro 9.

*Cambio de uso de suelos para el periodo 1999-2014*

CLASE	1999		2014		Ganancia o pérdida neta (km <sup>2</sup> )	%
	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%		
Territorios agrícolas	413.78	20.87	768.05	26.86	354.26	5.99
Vegetación arbustiva y/o herbácea	1465.57	38.79	1381.49	37.31	-84.08	-1.48
Bosques	725.86	26.19	475.15	21.87	-250.71	-4.32
Cuerpos de agua	19.58	14.15	10.72	13.96	-8.85	0.20

*Nota.* Elaboración propia

La segunda categoría más afectada en el cambio de uso de suelos fue la clase de bosques pues tuvo una reducción de 250 km cuadrados o una tasa de cambio del 4.2% de pérdida entre los periodos analizados. Las razones principales de la pérdida de cobertura boscosa, para el periodo estudiado se adjudican a la deforestación e incendios forestales para el crecimiento de la actividad productiva agrícola, información que se evidencia con la ganancia de territorios agrícolas en la cuenca.

El uso de leña por los habitantes del área rural para su utilización en la cocina de alimentos es un factor constante en toda la cuenca, puesto que la calidad de vida y el poder económico de la región es bajo (FCCEE, 2013).

Otra categoría que tuvo un comportamiento atípico en la clasificación fue la macro clase de cuerpos de agua, pues esta se observa en gran disminución entre los años anteriores variando en un área de 5.92 km cuadrados. Este comportamiento se debe a 2 razones principales, la primera siendo que el caudal del río y sus afluentes ha disminuido de gran manera, esto es una realidad pues según un informe de Servicio Nacional de Estudios Territoriales en el año 2002 se realizó un monitoreo de caudales en las estaciones La Hachadura y La Atalaya dando como resultados caudales 20% por debajo de los promedios históricos.

En vista de la disminución gradual de los caudales de las estaciones analizadas, el SNET realizó una proyección en el tiempo trazando líneas de tendencia de los caudales para los meses correspondientes a la época seca. Como resultado, la estación La Hachadura presenta una tendencia a pasar de río permanente a corriente de invierno cerca del año 2100 para el mes más crítico (SNET, 2002).

La otra razón para la cantidad tan radical en el aumento de área en esta categoría es atribuida a errores de la clasificación pues el algoritmo del programa utilizado es el de máxima probabilidad, lo que quiere decir que, si la mayoría de los píxeles alrededor del río son de vegetación arbustiva, se hará un promedio y se asignará el píxel a la clase mayoritaria. Esto en parte también es relacionado a lo discutido en el párrafo anterior pues el aumento de sedimento en el cauce principal del río provoca que sea más difícil para el programa identificar agua y lo clasifique en vez como vegetación arbustiva, pues en esta categoría se clasificó la arena.

Esta confusión se hace más evidente la Figura 56 donde se observa la imagen satelital de Google Earth en enero 2014, fecha más cercana a la imagen satelital estudiada para el mismo año se observa una gran concentración de arena alrededor del

cauce natural, razón por la cual el programa lo clasifica como territorio arbustivo o agrícola.

**Figura 56.**

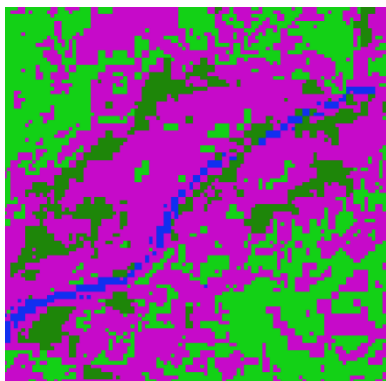
*Comparativa de error de clasificación de categoría cuerpos de agua*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 57.**

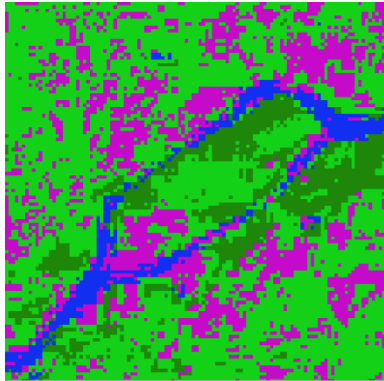
*Clasificación 2014*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 58.**

*Clasificación 1999*



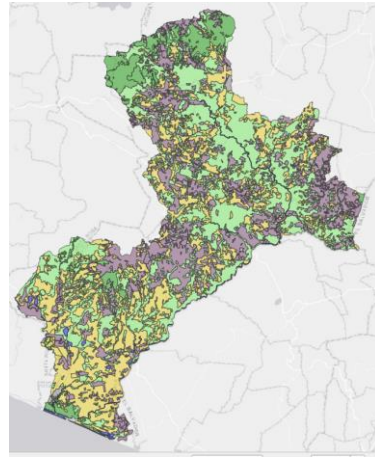
*Nota.* Elaboración propia

**B. Análisis de cambios de cobertura de suelo en el periodo de 2014-2023**

Para el periodo de 2014-2023 se observa un aumento significativo en la macro clase de territorios agrícolas, seguida con la disminución en la categoría de vegetación arbustiva. Según el mapa de uso de suelos del MAGA 2020, el 63 % del área de la cuenca perteneciente a Guatemala pertenece a territorios agrícolas, dentro de estos destacando en su mayoría los cultivos permanentes como el café, la caña de azúcar y los pastizales para la crianza agropecuaria. La categoría de bosques ocupa el 35 % de la cuenca en Guatemala, repartiéndose el resto de área en las categorías sobrantes. La Figura 59 muestra la porción utilizada del mapa de cobertura de suelos del MAGA, ajustando a las macro clases descritas en esta investigación. Los porcentajes discutidos se encuentran en el Cuadro 10.

**Figura 59.**

*Mapa de uso de suelo según categorías filtradas del MAGA 2020*



*Nota.* Elaboración propia

**Cuadro 10.**

Distribución de uso de suelo en la cuenca según MAGA 2020

ID	CLASE	%
<b>1</b>	<b>Territorios artificializados</b>	<b>1.6%</b>
<b>2</b>	<b>Territorios agrícolas</b>	<b>62.6%</b>
2.1	Pasto natural	36.1%
2.2	Granos básicos	20.6%
2.3	Cultivos permanentes	43.2%
<b>3</b>	<b>Vegetación arbustiva</b>	<b>29.7%</b>
<b>4</b>	<b>Bosques y medios seminaturales</b>	<b>5.6%</b>
<b>5</b>	<b>Cuerpos de agua</b>	<b>0.6%</b>

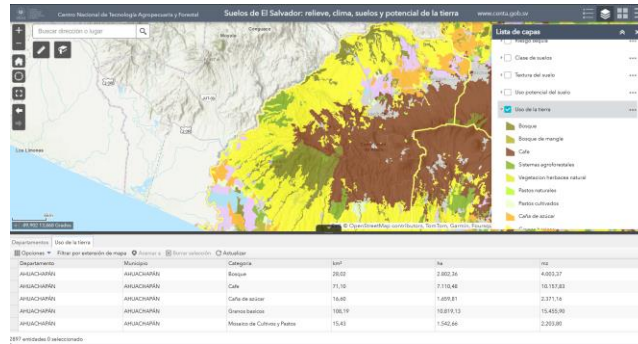
*Nota.* Elaboración propia

En el caso del área de la cuenca perteneciente al Salvador, no se tiene el área exacta que representa la cuenca, pero se aproximó su clasificación con el uso de suelos del departamento de Ahuachapán, fronterizo con Guatemala y el departamento con mayor incidencia en la cuenca. En base a lo anterior, se tiene que en su mayoría el uso de suelos está distribuido en la categoría de granos básicos, la siembra de café y bosques. En esta parte de la cuenca se destaca una mayor cobertura de territorios artificializados por tener ciudades grandes como lo son Ahuachapán y Atiquizaya, pero para objetos de

esta discusión no se tomarán en cuenta zonas urbanas, esto se ve reflejado en la Figura 60 (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal, s. f.).

**Figura 60.**

*Geo portal del SENTA para la aproximación de usos de suelo*



*Nota.* Elaboración propia

**Cuadro 11.**

*Cambio de uso de suelos para el periodo 2014-2023*

CLASE	2014		2023		Ganancia o pérdida neta (km2)	%
	Área (km2)	%	Área (km2)	%		
Territorios agrícolas	768.05	26.86	1,070.29	32.01	302.24	5.15
Vegetación arbustiva y/o herbácea	1381.49	37.31	1,054.92	31.75	-326.57	-5.57
Bosques	475.15	21.87	495.35	22.21	20.20	0.34
Cuerpos de agua	10.72	13.96	14.99	14.03	4.26	0.07

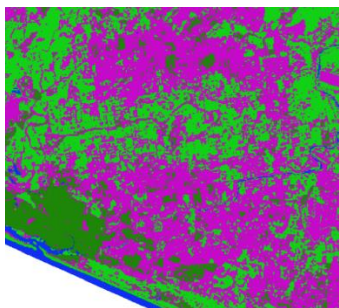
*Nota.* Elaboración propia

La información obtenida en el Cuadro 11 es validada con la información que se citó anteriormente pues la gran mayoría del área de la cuenca para el año 2023 ha sido destinada a territorios agrícolas, principalmente al café y cultivo de granos básicos, actividad que comparten las 2 naciones implicadas en la cuenca. La clase de bosques parece haber tenido un ligero incremento en su área entre los periodos de tiempo evaluados. Se destaca de esta categoría el aumento de territorios agrícolas en la cuenca

baja, principalmente en el área protegida del Zanjón El Chino ubicada en San Francisco Menéndez, el Salvador; la razón radica en la tala del ecosistema de manglar para la siembra de caña de azúcar. Para el 2014, la reserva contaba con más de 120 manzanas de árbol; para el siguiente año se contaba con 25 manzanas. La Figura 61 muestra el cambio de uso de suelos en la cuenca baja (Beltrán, 2015).

**Figura 61.**

*Cambio de uso de suelos cuenca baja Río Paz*



*Nota.* Elaboración propia

A través de la investigación exploratoria que se ha realizado en esta investigación se puede observar un fuerte cambio de uso de suelos en los periodos analizados hacia la agricultura, principalmente de la caña de azúcar, granos básicos como maíz y frijol, teniendo un crecimiento acelerado en los últimos 10 años. La mayor problemática con esto radica en que para sostener todos los cultivos mencionados es necesario desviar canales de agua, provenientes del río paz y sus afluentes.

Esta alta presión ha provocado que por la poca cobertura vegetal en la rivera del cauce principal se genere una pérdida de suelo en las partes medias y altas cuando aumenta súbitamente el caudal en época de invierno o temporal, y esta sea trasladada a la parte baja, donde la pendiente es menor, provocando el azolvamiento y depósito de material sedimentario.

Este comportamiento, acompañado con la pérdida progresiva del área de manglar en la desembocadura de la cuenca, es lo que ha provocado el aumento de inundaciones en la cuenca baja, pues como se discutió anteriormente, por las características

morfológicas de la cuenca, esta indicaba buenos valores para mitigar las inundaciones, sin embargo, ya no es el caso debido al deterioro ambiental observado en la cuenca en los últimos 20 años (RODRÍGUEZ, 2010).

Es necesaria la intervención de ambos estados para garantizar una protección ambiental de las zonas riverañas al cauce principal y sus ríos tributarios, la concientización ambiental de la población y la readecuación de los usos de suelos de manera responsables para paulatinamente poder recuperar la dinámica natural de la cuenca y de esta manera reducir los impactos de inundación en la parte baja de la cuenca.

## VIII. CONCLUSIONES

- La cuenca del río Paz cuenta con una morfometría favorable pues las características de densidad de corriente, la compacidad y forma indican que la cuenca es capaz de soportar cargas elevadas de agua en poco tiempo y drenar de manera correcta el flujo de agua hacia su desembocadura en el océano pacífico. Por ende, estas características indican un buen desempeño de la cuenca ante las inundaciones, la problemática de las crecidas en la parte baja son cada vez más frecuentes y con mayor intensidad. Esto indica que existe un deterioro ambiental en los usos de suelo, debido a la intervención humana.
- Tras la reclasificación de macro clases realizadas se identificó que los territorios agrícolas fueron los que tuvieron un aumento mayor en el área total de la cuenca, siendo la caña de azúcar y los granos básicos, como maíz y frijol, la actividad principal de la cuenca.
- Se realizaron los mapas de cambio de cobertura de suelo, identificando las clases con mayor incidencia en la cuenca.
- La clasificación multitemporal de los usos de suelos en la cuenca no se realizó de la manera más óptima, pues debido a la similitud de algunas macro clases dentro de la clasificación, se clasificaron pixeles de manera errónea en los mapas de uso de suelo, provocando un porcentaje de error demasiado elevado en todos los años estudiados, por ende, se recurrió a disminuir la cantidad de marco clases asignadas, entregando mejores resultados de precisión en el programa, pero disminuyendo su exactitud con la realidad.

## IX. RECOMENDACIONES

- El análisis de cambio de uso de suelos a través de la metodología de clasificación de píxeles realizada en esta investigación puede funcionar de manera más acertada en áreas de estudio de menor tamaño, puesto que disminuye la variación de las firmas espectrales tanto en una misma clase como entre varias macro clases y clases frontera.
- Para tener una exactitud más adecuada se recomienda comparar imágenes de un mismo año en distintas temporadas para así general un promedio de firmas espectrales en las clases con mayor confusión, como lo fue en esta investigación la macro clase de agricultura.
- Para análisis de cuencas extensas como la de esta investigación, se recomienda dividir el área de la cuenca en subpartes, como lo podría ser: cuenca alta, media y baja, con el objetivo de homogenizar las clasificaciones disminuyendo el error de confusión entre píxeles.
- Se recomienda realizar el mayor número posible de muestras por clase para disminuir la incertidumbre en su clasificación, sobre todo en áreas de gran extensión como lo fue esta investigación.
- Se recomienda utilizar otros satélites que ofrezcan una mejor resolución de imagen como lo pueden ser las imágenes SENTINEL.
- Se recomienda utilizar el programa Collect Earth como alternativa a las salidas de campo.

- Se recomienda integrar la metodología de árboles de decisión para la mejorar la precisión entre las clases.
- Se recomienda siempre validar los resultados obtenidos rectificando con visitas de campo e información auxiliar para la validación de los datos de la investigación.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara B., Germán H., 2014. *Análisis de los cambios de la cobertura y uso de la tierra*.  
Gobierno Regional Cajamarca.
- Alcaraz, F. 2013. *Fundamentos de la clasificación de la vegetación*. Universidad de  
Murcia España: <https://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema10.pdf>
- Arezo, M. 2010. *Sensores remotos satelitales en la medición del impacto ambiental en  
minería*. Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a  
Emergencias.
- Beltrán, M. (1 de abril de 2015). *Denuncian que alcalde de San Francisco Menéndez  
deforestó área protegida por intereses económicos*. Gato Encerrado:  
<https://gatoencerrado.news/2015/03/31/alcalde-deforestacion-area-protegida/>
- Breña, A., y Jacobo, M. 2006. *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*.  
Universidad Autónoma Metropolitana:  
<https://agua.org.mx/wpcontent/uploads/2012/04/PrincipiosyFundamentosdelaHidrologiaSuperficial.pdf>
- Campbell, J. G: *The use of Landsat MSS data for ecological mapping*, en J.G.Campbell,  
Ed, *Matching Remote Sensing Technologies and Their Applications* [El uso de  
datos Landsat MSS para cartografía ecológica, en J.G.Campbell, Ed, *Matching  
Remote Sensing Technologies and Their Applications*], London (1981), Remote  
Sensing Society, pp. 143-162.

- Campbell, J.B: *Introduction to Remote Sensing [Introducción a la teledetección]*, New York (1987), The Guilford Press.
- Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. (s. f.). *Suelos de El Salvador: relieve, clima, suelos y potencial de la tierra [Conjunto de datos]*:  
<https://centa.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=4debbfad352c4537b405f046bd5de753>
- Chintana. (s. f.). OpenFlows FLOOD: Flood Modeling Software | Bentley Systems.  
Bentley Systems | Infrastructure Engineering Software Company: <https://es-la.bentley.com/software/openflows-flood/>
- Chiarito, E., Zimmermann, E., y Méndez, S. 2018. *Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección*. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidro ambientales.
- Chuvieco Salinero, E. (2006): *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona, Ariel.
- Congalton, R.G: *Using spatial autocorrelation analysis to explore the errors in maps generated from remotely sensed data, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing" [Uso del análisis de autocorrelación espacial para explorar los errores en mapas generados a partir de datos de sensores remotos, "Ingeniería fotogramétrica y teledetección"]*, vol. 54 (1988a), pp. 587-592.
- Congalton, R.G: *A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing"[Una comparación de los esquemas de muestreo utilizados en la generación de matrices de error para*

*evaluar la precisión de los mapas generados a partir de datos de teledetección, "Ingeniería fotogramétrica y teledetección"]*, vol. 54 (1988b), pp. 593-600.

Facultad de ciencias económicas Universidad de San Carlos de Guatemala. (2013).

*"Diagnóstico socioeconómico, potencialidades productivas y propuestas de inversión" municipio de Jutiapa departamento de Jutiapa:*

[http://www.biblioteca.usac.edu.gt/EPS/03/03\\_0822\\_v1.pdf](http://www.biblioteca.usac.edu.gt/EPS/03/03_0822_v1.pdf)

Fernández A., González R., Llanes A., 2013. *Teledetección Sistemas operacionales de observación de la Tierra*. XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección. INTA, Torrejón de Ardoz. Madrid.

Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G., Denegri, G., Besteiro, S., y Delgado, M. L. (2012). *Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce*

Grande, Buenos Aires, Argentina. AUGMDOMUS, 4. Gilabert, MA; González-Piqueras, J; García-Haro, J. 1997. *Acerca de los índices de vegetación. Revista de teledetección*. págs. 810:

Hernández, A. (2012). *Cambio climático en Guatemala Efectos y consecuencias en la niñez y la adolescencia*. En UNICEF:

<https://www.unicef.org/guatemala/media/1391/file/Cambio%20clim%C3%A1tico%20en%20Guatemala.pdf>

IGN. (2020). Instituto geográfico nacional español:

<https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-teledeteccion>

Isidro, M., Díez-Herrero, A., y Laín, L. (2009). *Aplicaciones de los SIG al análisis y gestión del riesgo de inundaciones: avances recientes*. Sigefor:

[https://www.andresdiezherrero.es/publicaciones/articulos\\_en\\_revistas/llorente\\_et\\_al\\_2009\\_sigtefor.pdf](https://www.andresdiezherrero.es/publicaciones/articulos_en_revistas/llorente_et_al_2009_sigtefor.pdf)

INEGI. (2015). Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción. En [inegi.org.mx](http://inegi.org.mx):

<https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/relieve/continental/doc/mde.pdf>

Landsat 7. (Agosto, 2021). USGS: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7missions/landsat-7>

Linsley, R.K., Kohler, M.A. y Paulhus, J.L., 1977: Hidrología para ingenieros. 386 págs. Ed. McGrawHill, México

Lund University. (s. f.). MAP Accuracy Assessment [Diapositivas]:

[https://www.nateko.lu.se/sites/nateko.lu.se.sv/files/assessment\\_of\\_classification\\_accuracy2.pdf](https://www.nateko.lu.se/sites/nateko.lu.se.sv/files/assessment_of_classification_accuracy2.pdf)

Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca. 2011. Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura (en línea). Ecuador:

<http://www.sigtierras.gob.ec/cobertura-y-uso-de-la-tierra/#>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible [MINAMBIENTE]. (2017).

Programas y planes de ordenación y manejo de cuenca hidrográfica.

Recuperado 2 de julio de 2024,

[https://es/Planes\\_y\\_Programas/Planes\\_de\\_Ordenacion\\_y\\_Manejo\\_de\\_Cuenca\\_Hidrografica/La%20Vieja%20%20POMCA%20en%20Ajuste/Fase%20Diagnostico/7\\_CapituloI\\_Diagnostico\\_Morfometria.pdf](https://es/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuenca_Hidrografica/La%20Vieja%20%20POMCA%20en%20Ajuste/Fase%20Diagnostico/7_CapituloI_Diagnostico_Morfometria.pdf)

Module Fill Sinks (Wang y Liu) / SAGA-GIS Module Library Documentation (V2.1.3).

(V, Wichmann):

[https://sagagis.sourceforge.io/saga\\_tool\\_doc/2.1.3/ta\\_preprocessor\\_4.html](https://sagagis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.1.3/ta_preprocessor_4.html)

- Narváez, L; Lavell, A; Pérez Ortega, G. 2009. La gestión de riesgo de desastres: un enfoque basado en procesos. Lima, Perú, Comunidad Andina / PREDECAN. P.32
- Nunez, C. (2017). ¿Qué son las inundaciones? Nacional Geographic: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/inundaciones>
- Ordoñez, Juan. (2011). ¿Qué es cuenca hidrológica? 1ª Edición. Sociedad Geográfica de Lima. 44 págs.
- Ordóñez hoyos, a. e., y Serna Castaña, j. (2015). Análisis superficial y multitemporal de imágenes landsat 7 etm+ y landsat 8 oli tirs en el proyecto carbonífero la luna entre los años 2001 y 2015 tesis de la Universidad de Manizales. 22 págs.
- Pérez E., García R. P., 2013. Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid. Pontius, RG; Shusas, E; McEachern, M. 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. Agriculture, Ecosystems y Environment 1012:251-268.
- Polo, R. B. (s. f.). ¿Qué es HEC-RAS y para qué sirve? [https://www.geasig.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/#:~:text=HEC%2DRAS%20\(Hydrological%20Engineering%20Center,Modelizaci%C3%B3n%20del%20trasporte%20de%20sedimentos](https://www.geasig.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/#:~:text=HEC%2DRAS%20(Hydrological%20Engineering%20Center,Modelizaci%C3%B3n%20del%20trasporte%20de%20sedimentos)
- RODRÍGUEZ, E. (2010). Dinámica hidrológica en la cuenca baja del río Paz: [https://www.academia.edu/32163847/Din%C3%A1mica\\_hidrol%C3%B3gica\\_en\\_la\\_cuenca\\_baja\\_del\\_r%C3%ADo\\_Paz\\_Guatemala\\_El\\_Salvador](https://www.academia.edu/32163847/Din%C3%A1mica_hidrol%C3%B3gica_en_la_cuenca_baja_del_r%C3%ADo_Paz_Guatemala_El_Salvador)
- Sánchez, J. (2016, 1 octubre). Análisis de calidad cartográfica mediante el estudio de la

matriz de confusión. La Revista de Investigación e Innovación Educativa  
“Pensamiento Matemático” (PM).

Sala, O. E., F. S. Chapin, J. J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L. F. Huenneke, R. B. Jackson, A. Kinzig, R. Leemans, D. M. Lodge, H. A. Mooney, M. Oesterheld, N. L. Poff, M. T. Sykes, B. H. Walker, M. Walker and D. H. Wall (2000), "Biodiversity: global biodiversity scenarios for the year 2100"["Biodiversidad: escenarios globales de biodiversidad para el año 2100"], Science, 287 pp. 1770-1774.

SNET. (Julio de 2002). Informe del análisis del comportamiento hídrico en El Salvador, posibles causas e implicaciones, Servicio Nacional de Estudios Territoriales:  
[http://www.snet.gob.sv/Documentos/comp\\_hidrico.htm](http://www.snet.gob.sv/Documentos/comp_hidrico.htm)

Suarez, GA. 2011. Cuencas hidrográficas de Guatemala Ed. GDLRD Guatemala.  
Guatemala, 52 p.

Velásquez, Sergio. (2018). Práctica No.5: Transformación de Imágenes. Diplomado Virtual en Procesamiento de Imágenes Teledetectadas. Turrialba, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Costa Rica. 33 págs.

Villón, B. M. 2002. Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica-CRRH. Cartago, Costa Rica, CA.g

Wichmann, V. (2007). Module Fill Sinks XXL (Wang y Liu). SAGA-GIS Module Library Documentation (v2.2.4):

[https://sagagis.sourceforge.io/saga\\_tool\\_doc/2.2.4/ta\\_preprocessor\\_5.html](https://sagagis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.2.4/ta_preprocessor_5.html)

SNET. (Julio de 2002). *Informe del análisis del comportamiento hídrico en El Salvador, posibles causas e implicaciones*. Recuperado el 15 de noviembre de 2010, de

Servicio Nacional de Estudios Territoriales:

[http://www.snet.gob.sv/Documentos/comp\\_hidrico.htm](http://www.snet.gob.sv/Documentos/comp_hidrico.htm)

Torres, L. (2015). SIG aplicado a la zonificación por amenaza de inundación en la cuenca del río Polochic, Alta Verapaz, Guatemala Tesis de la Universidad San Francisco de Quito. 82 págs.

<https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/5671/1/122785.pdf>

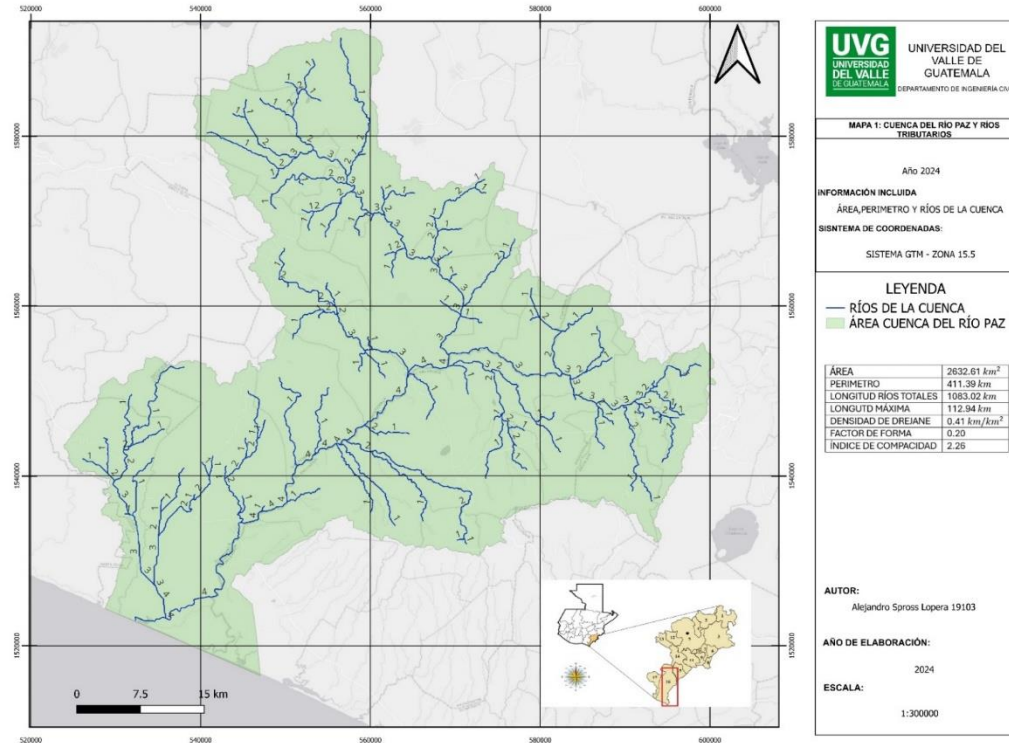
Villón, B. M. 2002. Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica-CRRH. Cartago, Costa Rica,

## XI. ANEXOS

### Anexo 1.

#### *Cuenca del río Paz y ríos tributarios*

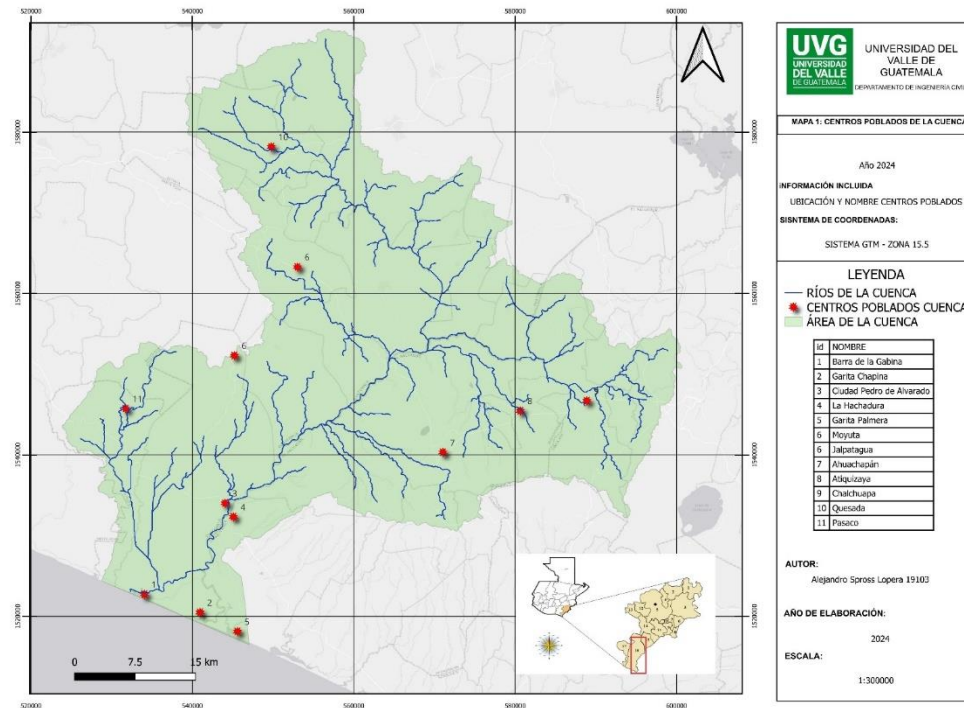
El Anexo 1 muestra las características hidrológicas principales de la cuenca como los ríos, el orden de estos, el área y perímetro de la cuenca, así como parámetros específicos de su morfometría.



## Anexo 2.

### *Centros Poblados de la cuenca*

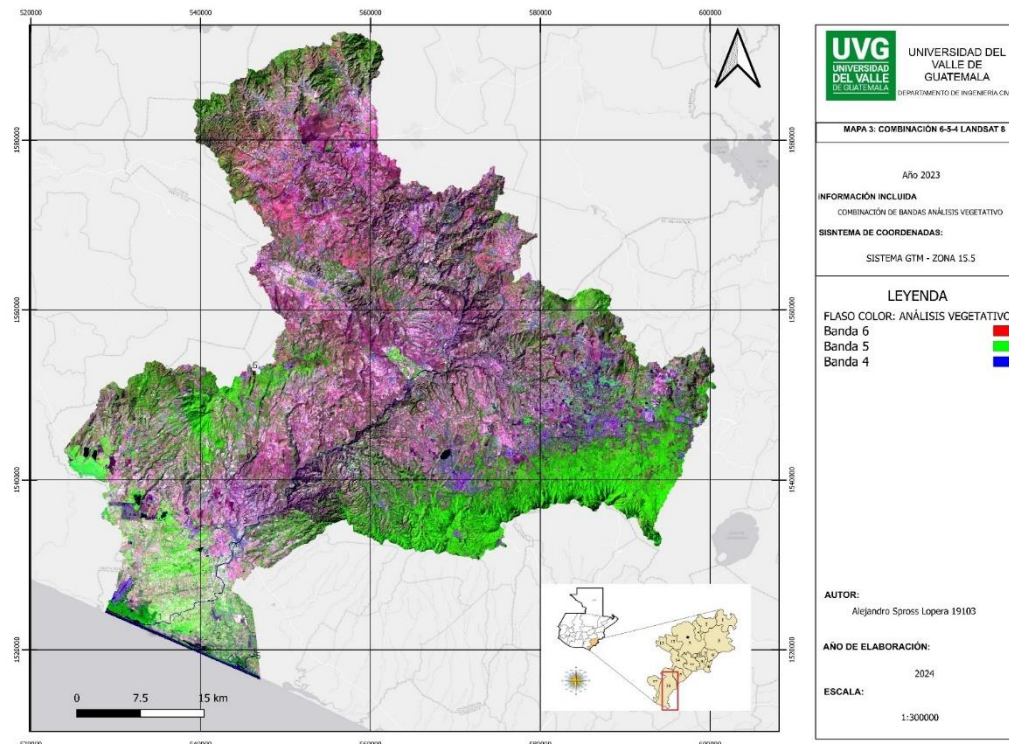
El Anexo 2 hace referencia a los centros poblados más relevantes de la cuenca pues estos toman importancia al momento de realizar una gestión integral de la cuenca, sobre todo en el tema de inundaciones. Los centros poblados más relevantes son Jalpatagua y Ciudad Pedro de Alvarado en Guatemala y Ahuachapán en el Salvador. Tanto Ciudad Pedro de Alvarado como La Hachadura son de gran importancia estratégica pues son el paso fronterizo de carga más importante entre los dos países y su cercanía al cauce del río Paz los hace vulnerables frente a los desastres naturales.



### Anexo 3.

#### *Combinación de banda análisis vegetativo para LANDSAT 8*

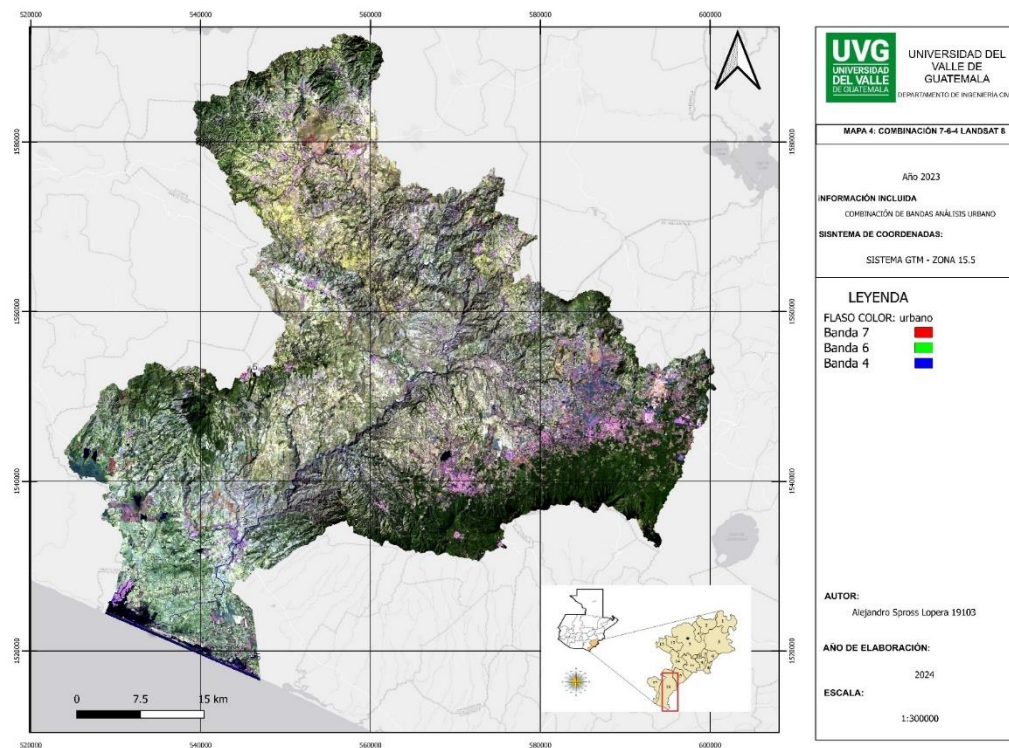
El Anexo 3 muestra cómo se utiliza la combinación de banda 6-5-4, también llamada falso color vegetativo. Esta combinación de bandas fue crucial en la investigación pues ayudó a identificar las zonas boscosas más relevantes de la cuenca.



## Anexo 4.

### *Combinación de banda análisis urbano para LANDSAT 8*

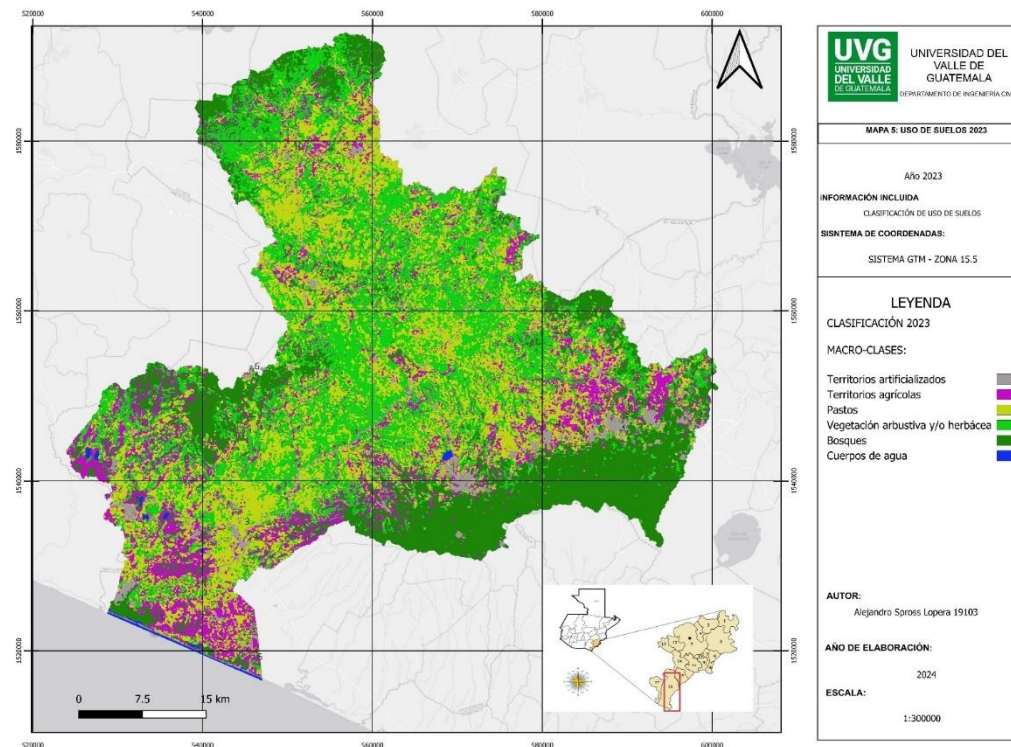
El Anexo 4 muestra como se utiliza la combinación de bandas 7-6-4, también llamado el falso color urbano. Esta combinación sirvió para identificar con mayor facilidad las áreas pobladas de la cuenca y así evaluar su evolución en los periodos de tiempo estudiados.



## Anexo 5.

### *Clasificación uso de suelos 2023*

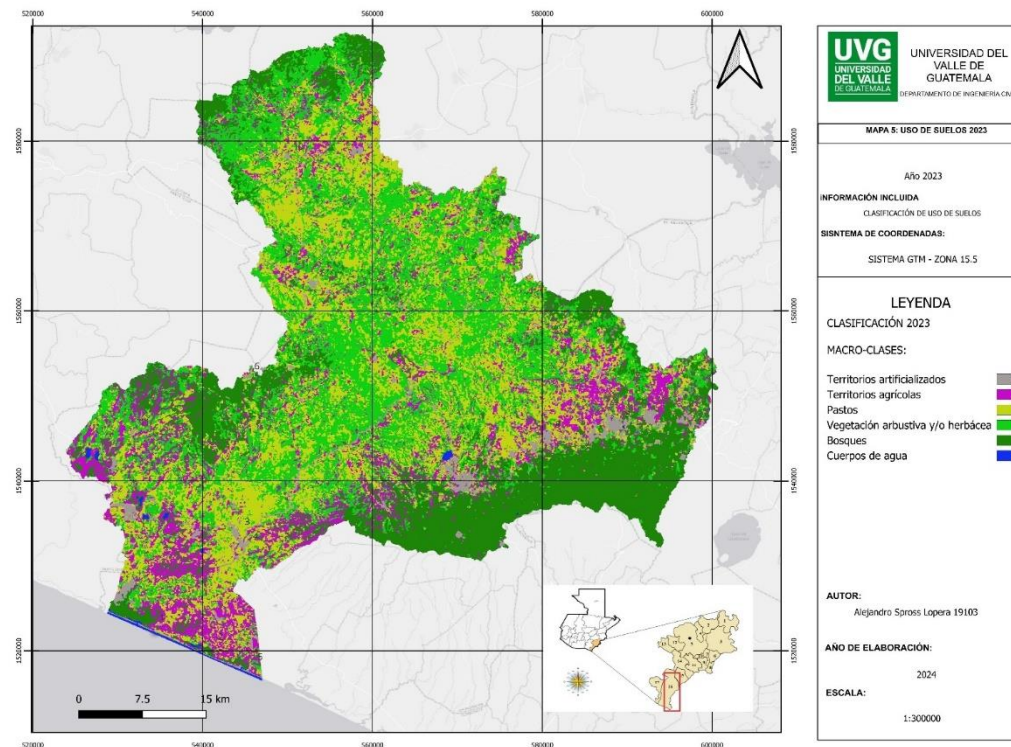
El Anexo 5 muestra el resultado que se obtuvo con la clasificación de las clases planteadas inicialmente para el año 2023.



## Anexo 6.

### *Clasificación uso de suelos 2014*

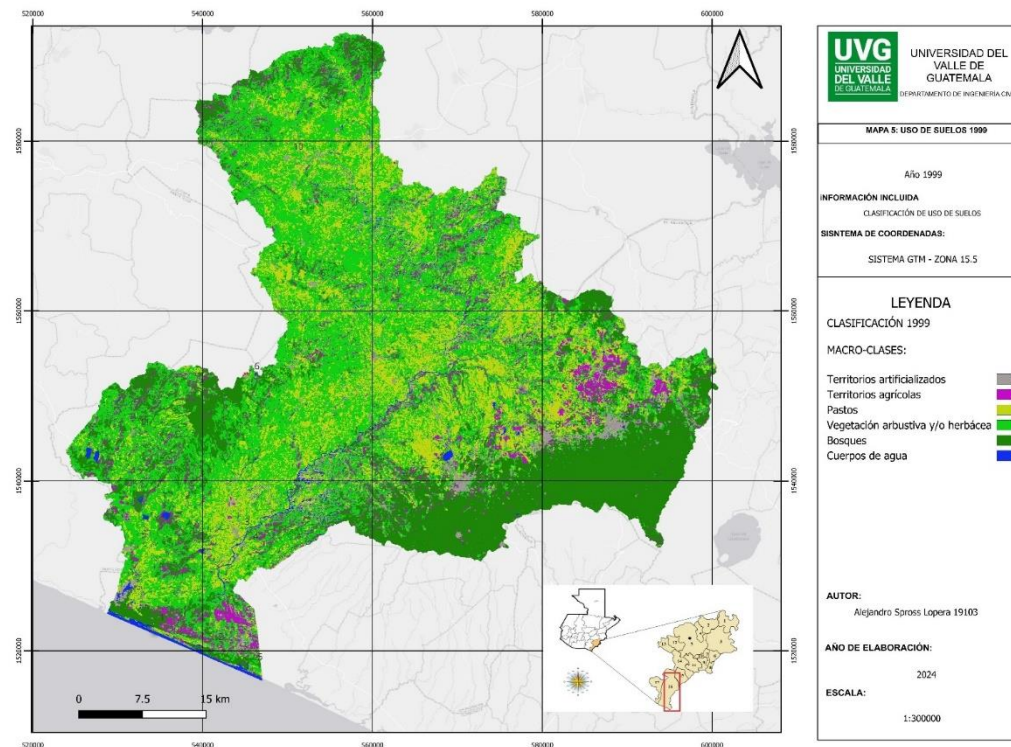
El Anexo 6 muestra el resultado que se obtuvo con la clasificación de las clases planteadas inicialmente para el año 2014.



## Anexo 7.

### *Clasificación uso de suelos 1999*

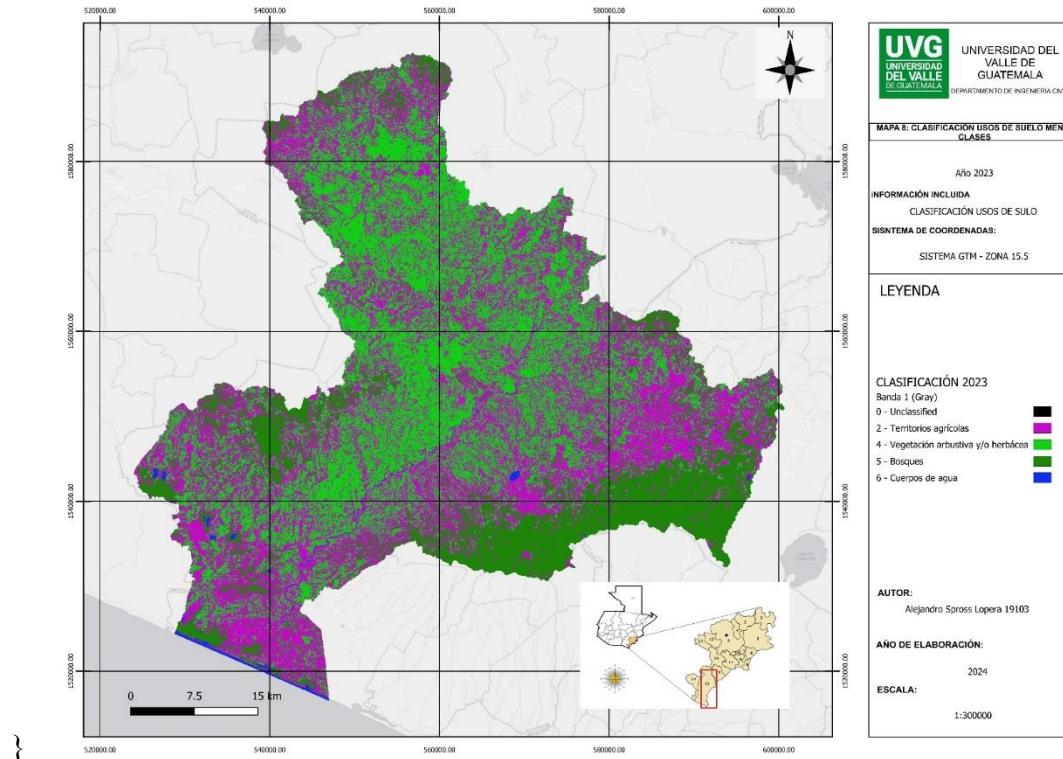
El Anexo 5 muestra el resultado que se obtuvo con la clasificación de las clases planteadas inicialmente para el año 1999.



## Anexo 8.

### *Clasificación uso de suelos con menos clases 2023*

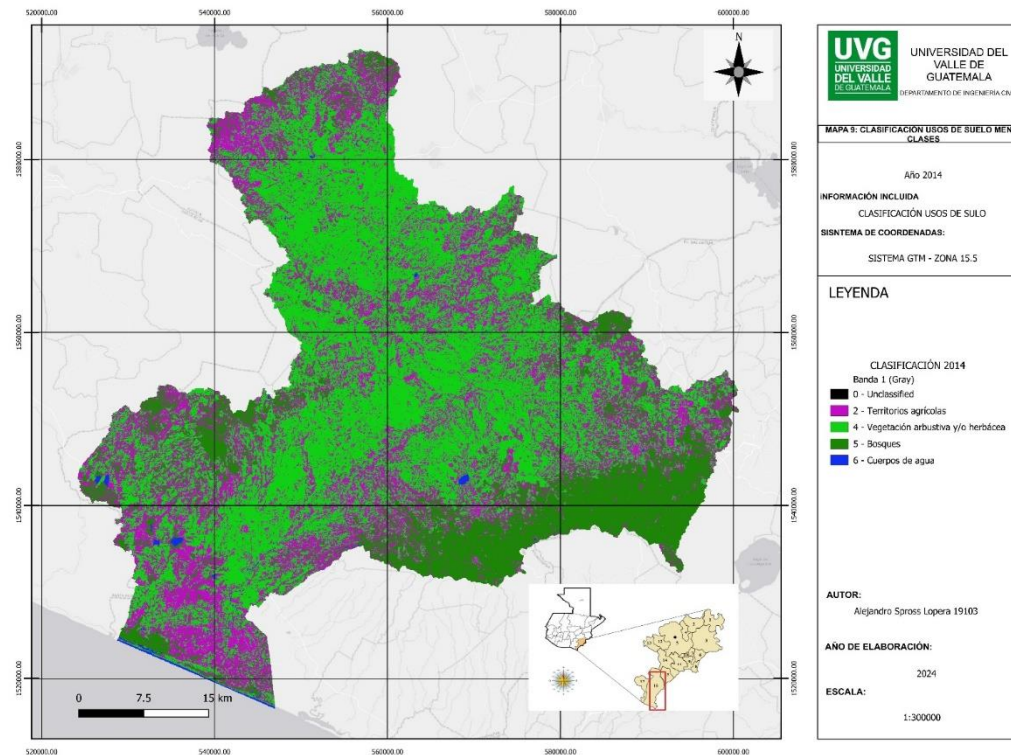
El Anexo 8 muestra el resultado que se obtuvo con la imagen del año 2023 con la reclasificación de las macro clases debido a la inexactitud del método anterior.



## Anexo 9.

### *Clasificación uso de suelos con menos clases 2014*

El Anexo 8 muestra el resultado que se obtuvo con la imagen del año 2014 con la reclasificación de las macro clases debido a la inexactitud del método anterior.



## Anexo 10.

### *Clasificación uso de suelos con menos clases 1999*

El Anexo 8 muestra el resultado que se obtuvo con la imagen del año 2023 con la reclasificación de las macro clases debido a la inexactitud del método anterior.

