

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

1. Introducción

La hidrología, como campo de estudio fundamental en la gestión de recursos hídricos, considera el coeficiente de escorrentía como uno de los parámetros cruciales para comprender la transformación de la lluvia en caudal. Este coeficiente, influenciado por diversos factores como la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y el tipo de suelo, juega un papel fundamental en la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos y en la gestión sostenible de cuencas hidrográficas.

La cobertura vegetal, en particular, se ha identificado como un componente esencial que impacta significativamente en el coeficiente de escorrentía. Dada la dinámica y sensibilidad de la vegetación ante factores ambientales y cambios climáticos, su evolución a lo largo del tiempo puede tener un efecto determinante en el balance hidrológico de una cuenca. En este sentido, la cuenca del río Vitoria, situada en el corazón de la región de Tarija, adquiere una importancia vital para los habitantes locales, siendo el foco central de este estudio.

El objetivo de esta investigación radica en determinar los cambios en el coeficiente de escorrentía en la cuenca del río Vitoria a lo largo de los años comprendidos entre 2000 hasta 2024, con énfasis en el análisis de la evolución de la cobertura vegetal. Para lograr este propósito, se empleará la teledetección, haciendo uso de imágenes satelitales, como una herramienta indispensable para el registro histórico y el monitoreo de la cobertura vegetal en la cuenca. La implementación de una metodología sólida y establecida para la obtención de los coeficientes de escorrentía constituirá un pilar fundamental en esta investigación, garantizando la fiabilidad y la precisión de los resultados obtenidos.

1.1. Antecedentes

La sub cuenca Vitoria muestra una cobertura compuesta por Bosque o monte Ralo Andino Montano Semiárido, cuyo uso es destinado a la producción agropecuaria, extractivo forestal, Herbazal Graminoide Vivaz Puna Altoandina Árida, utilizada en el extractivo minero, Producción agropecuaria, también cuenta con una cobertura de Vegetación dispersa vivaz en pedregales puna altoandina semiárida.

La sub cuenca Vitoria presenta valles secos mesotérmicos (monte espinoso microfoliado y restos de bosque seco). Se encuentra conformada por montañas medias con disección ligera, y montañas altas con disección moderada, se encuentra ubicada entre las alturas de 2224 y 3952 msnm, con pendientes entre el 10 y 80%. Geológicamente pertenece a los periodos Cámbrico (Limolitas, lutitas, areniscas y ortocuarcitas) y Ordovícico (Areniscas, limolitas, cuarcitas, pizarras, lutitas y lavas almohadilladas). (Espejo, 2016)

1.2. Descripción del problema

La dinámica de la cobertura vegetal en una cuenca hidrográfica se ve afectada por una serie de procesos y fenómenos, como la deforestación, la expansión de áreas agrícolas, la urbanización creciente, la construcción de infraestructuras viales, la actividad ganadera y los impactos del cambio climático. Estos factores, que operan de manera continua a lo largo del tiempo, ejercen una influencia significativa en la transformación y la estructura de la cobertura vegetal en la cuenca, generando impactos ecológicos y socioeconómicos de gran alcance.

Los cambios en la cobertura vegetal de la cuenca tienen un impacto directo en los patrones de escorrentía durante los eventos de lluvia, lo que a su vez puede provocar aumentos en las crecidas fluviales, ocasionando daños considerables a las comunidades locales, las áreas de cultivo y pastoreo, así como a la infraestructura civil, como embalses, puentes y defensas ribereñas. La variabilidad de los coeficientes de escorrentía, fundamentales en los estudios hidrológicos y en el diseño de obras civiles, se ve directamente afectada por estos cambios en la cobertura vegetal.

A pesar de la diversidad de investigaciones que abordan el cambio en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, existe una carencia notable de enfoques específicos que aborden los efectos directos de estos cambios en los coeficientes de escorrentía de una cuenca, así como la influencia subsiguiente en los estudios hidrológicos. Esta brecha de conocimiento subraya la necesidad imperante de comprender en profundidad los mecanismos que vinculan los cambios en la cobertura vegetal con los procesos hidrológicos, con el fin de desarrollar estrategias efectivas de gestión y mitigación de riesgos.

1.3. Planteamiento del problema

¿Cuál es la relación entre la variación de la cobertura vegetal y el coeficiente de escorrentía en la cuenca del río Vitoria a lo largo de un período de 24 años, utilizando análisis de imágenes satelitales?

1.4. Justificación

La comprensión detallada de la dinámica de la cobertura vegetal en una cuenca hidrográfica es esencial para evaluar su impacto en la hidrología. La variación temporal de esta cobertura vegetal, que se ve influenciada por una serie de factores interrelacionados, desempeña un papel crucial en la modulación de los procesos hidrológicos y en la determinación de los coeficientes de escorrentía, que son parámetros fundamentales en la gestión de recursos hídricos.

Un análisis detallado y multitemporal de la cobertura vegetal en la cuenca del río Vitoria permitirá obtener información valiosa sobre la evolución de este factor a lo largo del tiempo, brindando una perspectiva histórica y actualizada de los cambios significativos y sus posibles implicaciones. Esto, a su vez, ofrecerá una base sólida para la identificación temprana de posibles problemas y la implementación de estrategias preventivas y correctivas que minimicen los impactos adversos en las obras civiles y en el ecosistema local.

Los resultados de esta investigación no solo contribuirán al conocimiento científico existente sobre la interacción entre la cobertura vegetal y los procesos hidrológicos, sino que también proporcionarán información crucial y específica sobre los coeficientes de escorrentía en la cuenca del río Vitoria. Estos hallazgos serán de utilidad directa para el desarrollo de estudios hidrológicos más precisos y para el diseño y la implementación efectiva de futuras obras civiles y medidas de gestión de recursos hídricos, con el objetivo de garantizar la sostenibilidad y la resiliencia del ecosistema local y las comunidades dependientes de él.

1.5. Alcance

La presente investigación se sitúa en la cuenca del río Vitoria conocida como el Rincón de la Vitoria, es parte de la cuenca del río Guadalquivir en el Departamento de Tarija, enfocada en la variación de la cobertura vegetal con el empleo de imágenes Landsat en el periodo de los años 2000 hasta 2024.

1.6. Objetivos

1.6.1. General.

Analizar la variación de la cobertura vegetal en la cuenca del río Vitoria a lo largo de un período de 24 años, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat, con el propósito de identificar los cambios en el coeficiente de escorrentía.

1.6.2. Específicos.

- Recopilar de manera sistemática imágenes satelitales Landsat adquiridas entre 2000 hasta 2024 que abarquen la cuenca del río Vitoria, con el propósito de identificar y analizar los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del período de estudio.
- Recolectar información detallada sobre los tipos de suelos y la topografía que abarcan la cuenca del río Vitoria, con el fin de comprender su influencia en la dinámica hidrológica.
- Utilizar el software ENVI y ArcGIS para procesar las imágenes satelitales y la información sobre suelos y topografía, respectivamente, con el propósito de generar mapas precisos y representativos de la cobertura vegetal y características del terreno en la cuenca del río Vitoria.
- Realizar un análisis interdisciplinario que integre datos de los mapas de vegetación, suelos y pendientes de la zona mediante métodos geoespaciales avanzados, con el objetivo de estimar de manera precisa los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río Vitoria.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

2.1. Cuenca hidrográfica

La cuenca es aquella superficie en la cual el agua precipitada se transfiere a las partes topográficas bajas por medio del sistema de drenaje, concentrándose generalmente en un colector que descarga a otras cuencas aledañas, o finalmente al océano. La cuenca hidrológica, junto con los acuíferos, son las unidades fundamentales de la hidrología. Desde el punto de vista de su salida existen dos tipos de cuencas: endorreicas (cerradas) y exorreicas (abiertas). (Breña Puyal y Jacobo Villa, 2006)

La cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido. (Villón Béjar, 2002)

2.1.1. Delimitación de la cuenca.

Para delimitar una cuenca se necesita el plano topográfico con las curvas de nivel, siguiendo las líneas del *divortium acuarum* (parteaguas), que es una línea imaginaria que divide cuencas adyacentes. Este parteaguas está formado por los puntos de mayor cota y cruza las corrientes en los puntos de salida, denominado estación de aforo. (Villón Béjar, 2002)

El mismo autor indica que para fines prácticos una cuenca puede ser dividida en Cuenca grande y pequeña. Una cuenca se considera grande cuando el área es mayor a 250 km² y se considera cuenca pequeña cuando su superficie varía desde unas cuantas hectáreas hasta los 250 km².

2.1.2. Parámetros geomorfológicos de la cuenca.

Es el estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca hidrográfica, dicha morfometría se utiliza para analizar la red de drenaje (relación de bifurcación Horton/Strahler, densidad de drenaje, longitud promedio del cauce), las pendientes (pendiente media de la cuenca y del cauce principal) y la forma de una cuenca (Factor de forma de Horton, coeficiente de circularidad de Miller, índice de Gravelius o coeficiente

de compacidad). Con la ayuda de la morfología de las cuencas se pueden estimar fácilmente variables hidrológicas.

2.1.3. Otros parámetros de la cuenca.

- a) *Área de la cuenca*. - Es la superficie de la cuenca en km², el área nos delimitará el tamaño de la cuenca y su clasificación respectiva. Está delimitada en su proyección horizontal por el parteaguas. Se obtiene de los mapas topográficos a través del uso de planímetros o herramientas del SIG.

Tabla 1 Clasificación del tamaño de cuencas.

Tamaño de la cuenca	Área de la cuenca en km ²
Muy pequeña	< 25
Pequeña	25 a 250
Intermedia – Pequeña	250 a 500
Intermedia – Grande	500 a 2.500
Grande	2.500 a 5.000
Muy grande	> 5.000

Fuente: Campos Aranda (1992).

- b) *Perímetro de la cuenca*. - Se refiere al borde de la forma de la cuenca proyectada en un plano horizontal obteniéndose después de delimitar la cuenca. (Villón Béjar, 2002)
- c) *Pendiente de la cuenca*. - La pendiente de una cuenca tiene una relación con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Entre los métodos que se tienen para evaluar este valor son: Criterio de Alvord, Criterio de Horton, Criterio de Nash y criterio del rectángulo equivalente. (Villón Béjar, 2002)
- Criterio de J. W. Alvord:

Ecuación 1

$$S = \frac{D * L}{A}$$

Donde S es la pendiente de la cuenca, D es el desnivel constante entre curvas de nivel en km, L es la longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca en km y A es el área de la cuenca en km².

- Criterio del rectángulo equivalente:

Ecuación 2

$$S = \frac{H}{L}$$

Donde H es el desnivel total (cota en la parte más alta – cota en la estación de aforo en km) y L es el lado mayor del rectángulo equivalente en km. (Villón Béjar, 2002)

Tabla 2 Clasificación del relieve de una cuenca de acuerdo a su pendiente.

Pendiente media (%)	Terrenos
0 – 2	Llano
2 – 5	Suave
5 – 10	Accidentado medio
10 – 15	Accidentado
15 – 25	Fuertemente accidentado
25 – 50	Escarpado
> 50	Muy escarpado

Fuente: Ortiz Vera (2004)

- d) *Índice de pendiente (Ip) (M. Roche).* - El grado de pendiente de una cuenca influye en el comportamiento hidrológico del mismo, a través de la velocidad que incide en el tiempo de concentración. La pendiente media de la cuenca es la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a áreas elementales en las que se puede considerar como constante la máxima pendiente. Para facilitar su obtención se hace uso de los conceptos del rectángulo equivalente:

Ecuación 3

$$lp = \frac{1}{L^2} \sum_2^N \sqrt{\frac{(\Delta Hi)^2 * Bi}{1000}}$$

Donde:

L: Longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (km)

ΔHi : Intervalos de altura considerados en el rectángulo equivalente (m)

B_i : Es la fracción del área total de la cuenca comprendida entre el intervalo de altura (km^2)

N: Número de curvas de nivel del rectángulo incluidos los extremos
(Fattorelli y Fernandez C., 2011)

- e) *Curva hipsométrica*. - Es la representación gráfica del relieve de una cuenca. Es la curva que puesta en coordenadas rectangulares representa la relación entre la altitud y la superficie parcial de la cuenca que queda sobre esa altitud. Se lo determina a partir de un mapa con curvas de nivel. Se lo grafica colocando en el eje de la X las áreas que quedan sobre las altitudes km^2 y en el eje Y la altitud en m.s.n.m. (Villón Béjar, 2002)

De esta curva se obtiene la relación hipsométrica (RH):

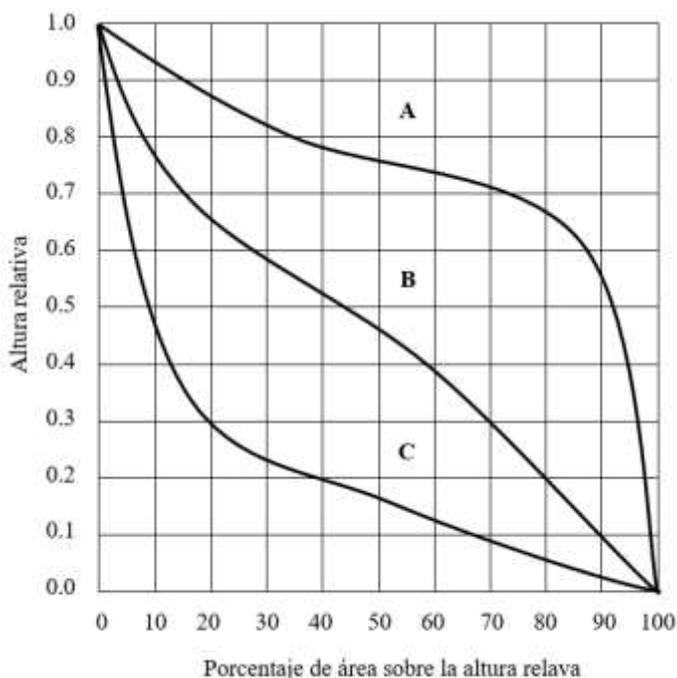
Ecuación 4

$$R_H = \frac{A_s}{A_b}$$

Donde:

A_s : Área sobre la curva hipsométrica

A_b : Área bajo la curva hipsométrica



*Ilustración 1 Curva hipsométrica.
Fuente: Maximo Villón.*

Cuando $RH = 1$, se trata de una cuenca en equilibrio morfológico. En la ilustración 1 se observa tres curvas: la curva A es una cuenca en fase juventud (cuenca que refleja un gran potencial erosivo), la curva B es una cuenca en fase madurez (característico de una cuenca en equilibrio) y la curva C es una cuenca en fase de vejez (cuenca sedimentaria). (Cahuana y Yugar, 2009)

- f) *Relación de relieve (Rr)*. - Es una función de la longitud de la cuenca L y de la diferencia de altura entre la salida de la cuenca y el punto más alto en la divisoria de la cuenca (h):

Ecuación 5

$$Rr = \frac{h}{L}$$

(Cahuana y Yugar, 2009)

2.2. Esguerrimiento

Conforme el ciclo hidrológico, el esguerrimiento es otro componente del ciclo hidrológico y se define como la porción de la precipitación pluvial que ocurre en una zona o cuenca hidrológica y que circula sobre o debajo de la superficie terrestre y que llega a

una corriente para ser drenada hasta la salida de una cuenca. (Breña Puyal y Jacobo Villa, 2006)

Cuando la lluvia alcanza un límite de infiltración o retención del terreno y vegetación, el excedente de agua origina escurrimiento sobre la superficie del terreno, el cual se mueve por efecto de la aceleración de la gravedad hacia las zonas bajas de la cuenca, a la precipitación que causa este escurrimiento superficial, se le conoce como precipitación en exceso (Villón Béjar, 2002).

Estos autores mencionan que para determinar los escurrimientos producidos por tormentas ocurridas en una cuenca se debe conocer la magnitud de las lluvias, las características fisiográficas de las subcuencas, topografía y la cobertura vegetal.

Conforme (Villón Béjar, 2002), el escurrimiento se clasifica en tres tipos: escurrimiento superficial (proviene de la precipitación no infiltrada, que escurre sobre la superficie, el efecto sobre el escurrimiento total es inmediato), escurrimiento subsuperficial (proviene de una parte de la precipitación infiltrada y su efecto sobre el escurrimiento total puede ser inmediato o retardado) y escurrimiento subterráneo (proviene del agua subterránea, que es recargado por la precipitación que se infiltra después de que el suelo se saturó). Con base en lo anterior, se tiene un escurrimiento directo (efecto inmediato) y un escurrimiento base (efecto retardado).

2.2.1. Fuentes del escurrimiento.

Cuando el suelo alcanza un contenido de humedad cercano a la condición de saturación el escurrimiento da inicio sobre el terreno. Seguidamente se iniciará un flujo tanto sobre las laderas, como a través de la matriz de los suelos. En la esorrentía superficial, el flujo se incorporará a algún tributario del sistema de drenaje de la cuenca. En el flujo subsuperficial, una parte del agua podrá percolar a sistemas más profundos, otra parte permanecerá como un almacenamiento temporal y otra regresará a la superficie (Breña Puyal y Jacobo Villa, 2006).

Las fuentes principales de escurrimiento en cauces se pueden clasificar en: precipitación directa sobre el cauce, flujo subsuperficial, flujo base y escurrimiento

directo. El aporte de la precipitación directa sobre el cauce es pequeño, debido al área menor de los cauces (Breña Puyal y Jacobo Villa, 2006).

Los volúmenes aportados por el flujo subsuperficial varían en el tiempo y en el espacio. El aporte por el flujo base es el aporte de un sistema acuífero somero a un cauce determinado. Y el escurrimiento directo, es aquel volumen asociado a la precipitación, que es el flujo remanente una vez que quedan definidas las primeras tres fuentes (Breña Puyal y Jacobo Villa, 2006).

2.2.2. Procesos del escurrimiento.

Para un análisis básico del escurrimiento, se deben considerar: la intensidad de la precipitación, la capacidad de infiltración, la condición hidráulica a la que se encuentra el suelo o roca y la característica del suelo o roca. Del análisis de estas variables se puede determinar los procesos que se pueden presentar (Breña Puyal y Jacobo Villa, 2006).

Si la intensidad de precipitación es menor que la capacidad de infiltración y el contenido de humedad del suelo o roca es menor a su capacidad de campo; entonces, el escurrimiento sobre la superficie del terreno será reducido y el flujo subsuperficial será aún más reducido.

Si la intensidad de precipitación es menor que la capacidad de infiltración y el contenido de humedad del suelo o roca es mayor o igual a su capacidad de campo; entonces, el flujo superficial será de poca cuantía y el flujo subsuperficial será importante.

Si la intensidad de precipitación es mayor que la capacidad de infiltración y el contenido de humedad del suelo o roca es menor a su capacidad de campo; entonces, el agua que precipite se utilizará en abastecer de humedad al suelo, teniendo una porción relativamente pequeña de escurrimiento.

Si la intensidad de precipitación es mayor que la capacidad de infiltración y el contenido de humedad del suelo o roca es mayor o igual a su capacidad de campo; entonces, la mayor parte del agua precipitada se convertirá en escurrimiento sobre el terreno, también será importante el flujo subsuperficial. Cuando la parte somera de un suelo no permite una infiltración importante, se forma el denominado flujo Hortoniano, donde la saturación del suelo o roca tendrá lugar sólo en una porción cercana a la

superficie, favoreciendo el escurrimiento sobre el terreno (Breña Puyal y Jacobo Villa, 2006).

2.2.3. Factores que afectan el escurrimiento superficial.

- a) *Superficie de la cuenca.* - Existe una relación inversa entre el tamaño de la cuenca y el caudal de descarga, el cual no es una relación lineal. Manteniendo las otras variables constantes, para cuencas de mayor área se observa una disminución relativa en el caudal máximo de descarga. También se observa que a mayor tamaño de cuenca, las intensidades de precipitación referidas a la cuenca serán menores (Villón Béjar, 2002).
- b) *Forma de la cuenca.* - También se indicó en la parte de morfometría de la cuenca, que la forma de la cuenca tiene una influencia notable en el escurrimiento sobre la superficie del terreno de una determinada cuenca.
- c) *Elevación de la cuenca.* - La elevación media y las elevaciones extremas de la cuenca influye en las características meteorológicas, que determinan principalmente las formas de la precipitación. En general, existe una relación directa entre la precipitación y la elevación de la cuenca (Villón Béjar, 2002).
- d) *Pendiente media de la cuenca.* - Es uno de los factores que mayor influencia tiene en la duración del escurrimiento, sobre el suelo y los cauces naturales, afectando la magnitud de las descargas. Influye además en la infiltración, humedad del suelo y probable aparición de aguas subterráneas al escurrimiento superficial (Villón Béjar, 2002).
- e) *Tipo y uso del suelo.* - Las características físicas, químicas y biológicas del suelo, así como su uso influye en la magnitud y distribución de los escurrimientos (Villón Béjar, 2002).
- f) *Estado de humedad antecedente del suelo.* - Si la humedad del suelo es alta en el instante de inicio de una tormenta, la cuenca generará caudales mayores debido a la reducción de la capacidad de infiltración del suelo (Villón Béjar, 2002).
- g) *Tipo de cubierta vegetal.* - Las vegetación juega un papel en la escorrentía ya que la precipitación se encuentra con el primer obstáculo para su recorrido hacia el punto de aforo.

2.3. Tipos de suelos y su clasificación hidrológica

La escorrentía superficial aparece cuando el suelo se satura de agua (la gran mayoría del volumen de los macroporos está relleno de agua, por lo que no es posible incorporar más agua al sistema), o bien, el aguacero aporta una cantidad de agua en superficie superior a la capacidad del suelo para infiltrar ésta (la intensidad de precipitación supera la tasa de infiltración). Para un suelo en capacidad de campo (ha escurrido toda el agua gravitacional de escurrimiento rápido), la capacidad potencial que muestra para generar escorrentía depende básicamente del valor de su conductividad hidráulica y de su capacidad de absorción. (Gómez-Sanz y Roldan Soriano, 2013)

La conductividad hidráulica del suelo es una propiedad intrínseca que viene determinada por la organización espacial de la fase sólida de la cual deriva un volumen de huecos (porosidad), que con el tiempo se hallan más o menos rellenos de agua en función de la evolución del estado hídrico del suelo. La porosidad efectiva para el drenaje del suelo (macroporosidad o porosidad estructural) es definida por la combinación de dos atributos edáficos, textura (tamaño de los materiales de la fase sólida) y la estructura (forma de agregación, resultado de la acción de diferentes agentes, entre los que juega un papel destacado la materia orgánica incorporada al suelo –humus-). (Gómez-Sanz y Roldan Soriano, 2013)

Por otro lado, la capacidad de absorción del suelo en un momento dado (volumen de agua que el suelo es capaz de incorporar hasta su saturación) va a depender del estado de humedad previo del suelo, de su grado de porosidad y de la posible existencia de limitaciones físicas para el desplazamiento interno del agua gravitacional (percolación o infiltración), fundamentalmente en sentido descendente. Concretamente, estas limitaciones van a generar una profundidad “efectiva” para el almacén de agua en el suelo.

La combinación de ambos factores, conductividad hidráulica y profundidad “efectiva”, supone la base teórica de la definición y delimitación de los distintos grupos hidrológicos considerados:

- Grupo A. Suelos con un potencial muy bajo para generar escorrentía. Derivado de la alta profundidad “efectiva” (no hay limitaciones físicas para la percolación del

agua), con buenas tasas de infiltración (velocidad de transmisión elevada por elevada macroporosidad de marcado carácter litológico).

- Grupo B. Suelo con potencial generador de escorrentía bajo. Su capacidad de infiltración es moderada, al presentar una profundidad “efectiva” superior a 1 m, con buena porosidad estructural (resultante de un elevado contenido en materia orgánica de los horizontes superficiales).
- Grupo C. Suelos con potencial medio para provocar escorrentía. El reducido contenido en materia orgánica o la presencia de materiales litológicos de texturas finas llevan a unas tasas de infiltración bajas, con independencia de la concurrencia o no de limitaciones físicas para la percolación a partir de los 25 cm.
- Grupo D. Suelo con alto potencial para provocar escorrentía. La infiltración está muy dificultada por la reducida macroporosidad que presenta el horizonte superficial o por el escaso valor de profundidad “efectiva” (inferior a 25 cm).

Tabla 3 Grupos hidrológicos.

GRUPO	INFILTRACIÓN	POTENCIA	TEXTURA	DRENAJE
A	Rápida	Grande	Arenoso Areno-Limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franco-arenosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-arcillosa Franco arcillo-limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy Lenta	Pequeña (litosuelo) u horizontes de arcilla	Arcillosa	Pobre o muy pobre

Fuente: SCS, 1964 en Bradbury et al.,2000

El sistema clasificatorio de suelos que ofrece la (FAO-UNESCO con la WRB - 2006) se fundamenta en la identificación y designación de tipologías edáficas por combinación

jerarquizada y progresiva de propiedades de diagnóstico (rasgos que pueden observarse o medirse en campo o en laboratorio y que reflejan resultados generalizados, comunes, de los procesos de formación de suelos (BRIDGES, 1997), materiales de diagnóstico (conjunto de materiales, minerales u orgánicos, que influyen de forma trascendente en los procesos pedogenéticos) y horizontes de diagnóstico –HD- (horizontes genéticos que reúnen una combinación de atributos morfométricos íntimamente ligados a los procesos edáficos de formación y diferenciación). (Gómez-Sanz y Roldan Soriano, 2013)

Tabla 4 Grupos de suelos de referencia, no modificados intensamente por el hombre, y grupo hidrológico asignado.

	GSR (FAO-UNESCO, 2006)	GRUPO HIDROLÓGICO
Histosol	Suelos orgánicos o turbosos. HD hístico.	
Gleysol	Suelos con patrón de color gleyco dentro de los 50 cm superficiales.	
Leptosol	Roca continua a una profundidad inferior o igual a 25 cm.	D
Calcisol pétrico / Gipsisol pétrico / Durisol pétrico / Solonchack petrosálico	Suelos con horizonte superficial o subsuperficial fuertemente cementados por precipitación química.	
Vertisol	suelos con propiedades vérticas.	
Andosol	suelos desarrollados sobre material tétrico.	
Calcisol / Gipsisol	Suelos con HD cálcico / gípsico. Textura frecuentemente limosas y arcillosas por disolución.	C
Alisol / Luvisol / Acrisol / Lixisol / Solonetz	Suelos con HD árgico.	
Planosol	Suelos con HD árgico y/o cambios textual abrupto.	
Solonchack	Suelos con HD sálico.	
Podzol	Suelos con HD espódico.	B
Kastanozem / Phaeozem	Suelos con HD superficial móllico (rico en MO).	

Umbrisol	Suelos con HD superficial úmbrico (rico en MO).	
Cambisol	Suelos con HD cámbico (estructural).	
Fluvisol / Regosol	Suelos sin HD intermedio y de texturas francas dominantes.	
Arenosol	suelos sin HD intermedio y de textura arenosa dominante.	A

“HD-horizonte de diagnostico” “MO-material organico”

Fuente: 6° Congreso Forestal Español - Asignación de grupo hidrológico del suelo a partir de clasificaciones edáficas de base.

2.4. Coeficiente de escorrentía *C*

El coeficiente de escorrentía es uno de los parámetros fundamentales de la hidrología superficial, pues representa la porción de la precipitación que se convierte en caudal y se representa por la letra *C* y es adimensional.

Ecuación 6

$$C = \frac{\text{Volumen de escorrentía superficial}}{\text{Volumen de precipitación total}}$$

Tabla 5 Coeficiente de escorrentía.

Tipo de vegetación	Pendiente (%)	Textura		
		Franco arenosa	Franco arcillolimoso franco limosa	Arcillosa
Forestal	0% - 5%	0.10	0.30	0.40
	5% - 10%	0.25	0.35	0.50
	10% - 30%	0.30	0.50	0.60
Praderas	0% - 5%	0.10	0.30	0.40
	5% - 10%	0.15	0.35	0.55
	10% - 30%	0.20	0.40	0.60
Terrenos cultivados	0% - 5%	0.30	0.50	0.60
	5% - 10%	0.40	0.60	0.70
	10% - 30%	0.50	0.70	0.80

Tabla 6 Coeficiente de escorrentíescorra.

Tipo de área drenada	Coeficiente C
Áreas comerciales	
Céntricas	0.7 - 0.95
Vecindarios	0.5 - 0.7
Áreas residenciales	
Familiares simples	0.3 - 0.5
Multifamiliares separadas	0.4 - 0.6
Multifamiliares concentradas	0.6 - 0.75
Semi-urbanos	0.25 - 0.4
Casas de habitación	0.5 - 0.7
Área industriales	
Densas	0.6 - 0.9
Espaciadas	0.5 - 0.8
Parques, cementerios	0.1 - 0.25
Campos de juego	0.1 - 0.35
Patios de ferrocarril	0.2 - 0.4
Zonas suburbanas	0.1 - 0.3
Calles	
Asfaltadas	0.7 - 0.95
De concreto Hidráulico	0.8 - 0.95
Adoquinadas	0.7 - 0.85
Estacionamientos	0.75 - 0.85
Techados	0.75 - 0.95

Fuente: Manual de Conservación del suelo y agua, Chapingo, México, 1977.

Tabla 7 Coeficiente de escorrentía.

COBERTURA VEGETAL	TIPO DE SUELO	PENDIENTE DEL TERRENO				
		Pronunciada >50%	Alta 50-20%	Media 20-5%	Suave 5-1%	Despreciable <1%
Sin Vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35

Pastos, Vegetación ligera		0.35				
	Permeable		0.30	0.25	0.20	0.15
	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
Hierba, grama	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosques, Densa Vegetación	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Nota: Coeficientes de escurrimiento según Lemus & Navarro (2003) citado por Cahuana y yugar (2009).

2.5. Teledetección o percepción remota

(Chuvieco, 1995) define la teledetección remota como el conjunto de técnicas que permiten adquirir información de objetos o fenómenos situados en la superficie terrestre sin necesidad de un contacto directo. Este proceso se realiza mediante el análisis de datos recogidos a través de sensores que captan la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos observados. Según Chuvieco, esta información es esencial para estudiar diversos aspectos del medio ambiente, como la vegetación, el clima, el suelo y los recursos hídricos, entre otros, permitiendo un análisis detallado y actualizado de grandes áreas.

2.5.1. La teledetección en el análisis multitemporal.

(Chuvieco, 1995) define el análisis multitemporal en teledetección como el estudio de los cambios en la superficie terrestre a través del tiempo, utilizando imágenes obtenidas en diferentes momentos. Este enfoque permite comparar datos satelitales de distintos períodos para detectar, analizar y cuantificar cambios en el uso del suelo, la vegetación y otros elementos ambientales. La teledetección multitemporal es clave para comprender dinámicas temporales y espaciales, ya que facilita el monitoreo continuo y la gestión de recursos naturales, además de la evaluación de los efectos de fenómenos naturales y actividad.

2.5.2. Espectro Electro-Magnético.

La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electro-magnético ilustración 2. comprende, en un continuo, desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X), hasta las kilométricas (telecomunicaciones). Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda. Para las más cortas se utilizan micras ($\mu\text{m} = 10^{-6}$ metros), mientras las más largas se miden en centímetros o metros. Normalmente a éstas últimas (denominadas micro-ondas) se les designa también por valores de frecuencias (en gigahercios, $\text{GHz} = 10^8$ Hz) (Chuvieco, 1995).

Desde el punto de vista de la teledetección conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual, su denominación y amplitud varía según distintos autores, bien la terminología más común es la siguiente:

- Espectro visible (0.4 a 0.7 μm), se denomina así por tratarse de la única radiación electro - magnética que pueden percibir nuestros ojos. Suelen distinguirse tres bandas espectrales que se denominan azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm).
- Infrarrojo próximo (0.7 a 1.3 μm), denominado también infrarrojo reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de filmes dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas de vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1.3 a 8 μm), en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre, resulta idóneo para estimar el contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

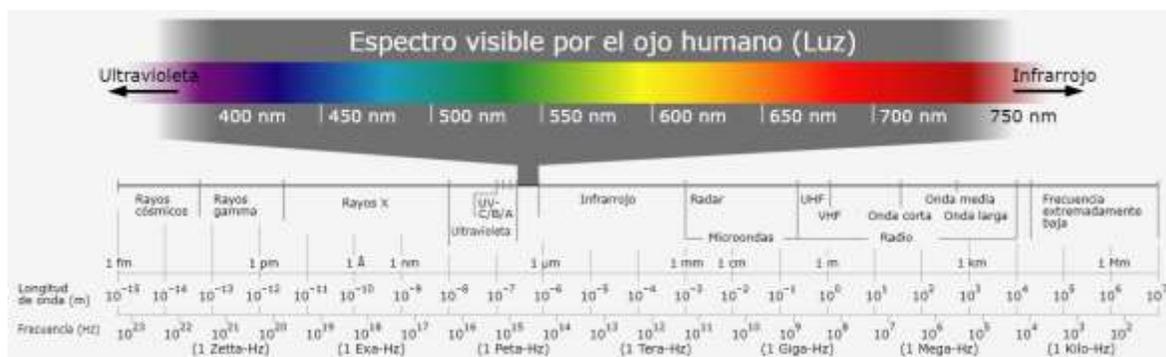


Ilustración 2 Espectro Electro - Magnético.

Fuente: www.ageudi.files.wordpress.com

2.5.3. Comportamiento espectral de la vegetación.

La caracterización espectral de las masas vegetales es, sin duda, una de las tareas más interesantes en la teledetección. Pese a su gran importancia, aun ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiancia final detectada por el sensor. En primera instancia, ha de considerarse la propia reflectividad de la hoja, en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad. Además es preciso tener en cuenta las características morfológicas de la planta: su altura, perfil, grado de cobertura del suelo, etc., que provocan una notable modificación de su comportamiento reflectivo. Un tercer grupo de factores serian los derivados de las situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, asociación con otras especies, geomatría de plantación, etc. (Chuvieco, 1995).

La reflectancia de la vegetación es usualmente relativamente baja en la región visible, con un máximo aproximadamente de $0.53 \mu\text{m}$, es decir en el verde. Aumenta bruscamente en el infrarrojo para luego caer a valores muy bajos a $2.5 \mu\text{m}$. la baja reflectancia en el visible se atribuye a la elevada absorción de los pigmentos vegetales, principalmente de la clorofila. Estos pigmentos, sin embargo, son altamente transparentes a elevada reflectancia en dicha región estaría determinada por la estructura interna de la hoja. Los mínimos de reflexión a 1.45 , 1.95 y $2.5 \mu\text{m}$ corresponden a la elevada absorción de las moléculas de agua presentes en las hojas ilustración 3.

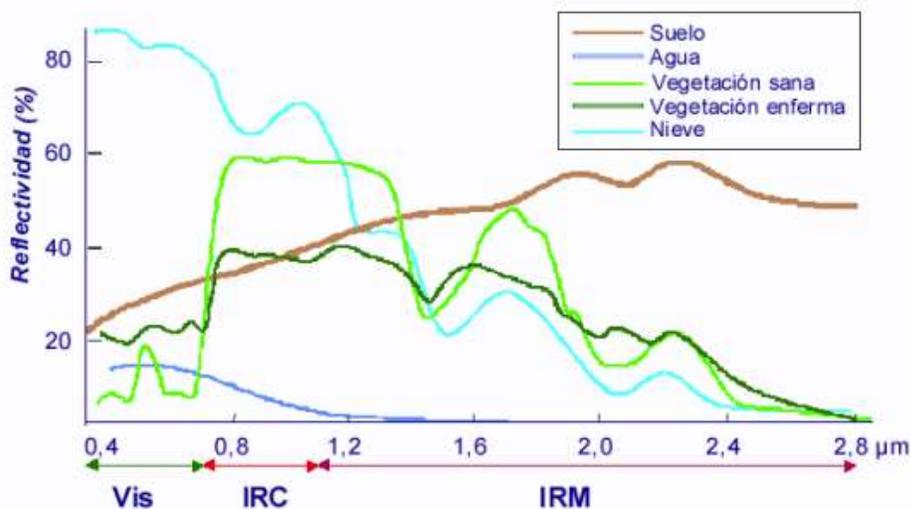


Ilustración 3 Firma espectral para distintos tipos de coberturas.

Fuente: www.fanpaulieb.blogspot.com

2.6. Satélites Landsat

Los satélites Landsat son una serie de misiones de observación de la Tierra lanzadas por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) desde 1972. Su objetivo es recopilar imágenes de alta calidad y datos sobre el planeta, útiles para estudios de cambio climático, uso del suelo, gestión de recursos naturales y monitoreo ambiental. Cada satélite cuenta con sensores avanzados que capturan imágenes multiespectrales, permitiendo a científicos y agencias gubernamentales analizar aspectos como la deforestación, el crecimiento urbano y la salud de los ecosistemas. Hasta la fecha, se han lanzado varias versiones, como Landsat 8 y 9, cada una con tecnologías mejoradas para captar datos. (NASA, 2023)

2.6.1. Landsat 7.

Landsat 7 está equipado con ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), que proporciona un reconocimiento terrestre en cuatro modos: VNIR (Visible and Near Infrared), SWIR (Infrarrojo de onda corta), PAN (Pancromático – Rango pancromático), TIR (Infrarrojo térmico – Rango infrarrojo térmico).

Tabla 8 Características del Landsat 7 bandas.

Sensor	Número de banda	Nombre de banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
ETM+	1	Azul	0.45-0.52	30
ETM+	2	Verde	0.52-0.60	30
ETM+	3	Rojo	0.63-0.69	30
ETM+	4	RIN	0.77-0.90	30
ETM+	5	SWIR 1	1.55-1.75	30
ETM+	6	Térmico	10.40-12.50	60*(30)
ETM+	7	SWIR 2	2.09-2.35	30
ETM+	8	Pancromático	0.52-0.90	15

Fuente: eos.com/find-satellite/landsat-7

2.6.2. Landsat 8.

El equipo de detección remota instalado en la LCDM (Landsat Data Continuity Mission) incluye un radiómetro de barrido multicanal OLI (Operational Land Imager) y un radiómetro infrarrojo de dos canales TIRS (Thermal Infrared Sensor). El instrumento OLI, desarrollado por Ball Aerospace & Technologies, opera en nueve longitudes de onda en el rango de 0.433-2.300 μm y proporciona imágenes con una resolución máxima de 15m utilizando avanzadas tecnologías de imágenes espaciales. Para su desarrollo se utilizó el satélite experimental EO-1 (lanzado en el año 2000 y equipado con el radiómetro Advanced Land Imager, un prototipo del radiómetro OLI).

Tabla 9 Características del Landsat 8 Bandas.

Sensor	Número de banda	Nombre de banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
OLI	1	Costera (Coastal)	0.43-0.45	30
OLI	2	Azul	0.45-0.51	30

OLI	3	Verde	0.53-0.59	30
OLI	4	Roja	0.63-0.67	30
OLI	5	RIN	0.85-0.88	30
OLI	6	SWIR 1	1.57-1.65	30
OLI	7	SWIR 2	2.11-2.29	30
OLI	8	Pancromático	0.50-0.68	15
OLI	9	Cirrus	1.36-1.38	30
TIRS	10	TIRS 1	10.60-11.19	30 (100)
TIRS	11	TIRS 2	11.50-12.51	30 (100)

Fuente: eos.com/find-satellite/landsat-8

2.7. Correcciones a las imágenes de satélites

Una imagen de satélite está sometida a una serie de interferencias que hacen que la información que quiere obtenerse aparezca perturbada por una serie de errores.

- Fallos en los sensores, generan píxeles incorrectos (corrección radiométrica)
- Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación en los sensores, generan distorsiones en la imagen global (corrección geométrica)
- Interferencia de la atmósfera, alteran de forma sistemática los valores de los píxeles (corrección atmosférica).

2.7.1. Corrección radiométrica.

De los tres tipos de correcciones que se mencionó esta es la más sencilla. De hecho en algunos casos las estaciones receptoras llevan a cabo algún tipo de corrección en el momento de recepción de la imagen. La corrección radiométrica implica por una parte la restauración de líneas o píxeles perdidos y por otra la corrección del bandeo de la imagen.

Píxeles o líneas perdidas. - Si se ha perdido el valor de algún píxel la solución más simple sería estimarlo como la media de los valores del mismo píxel en las líneas anterior

y posterior (no es recomendable utilizar los pixeles contiguos de la misma línea por que han sido captados por el mismo detector que ha dado el fallo, por tanto, son poco fiables).

Ecuación 7

$$ND_{ij} = \text{round} \left(\frac{ND_{i-1j} + ND_{i+1j}}{2} \right)$$

Donde round indica redondeo al número entero más cercano.

No hay que olvidar sin embargo que las diferentes bandas de una imagen están altamente correlacionadas y además los detectores de dos bandas diferentes no son los mismos. Por tanto, podría utilizarse el valor del pixel faltante en una banda diferente para mejorar la estimación:

Ecuación 8

$$ND_{i,j,k} = \text{round} \left(\frac{s_k}{s_r} \left(ND_{i,j,r} - \frac{ND_{i+1,j,r} - ND_{i-1,j,r}}{2} + \frac{ND_{i-1,j,k} + ND_{i+1,j,r}}{2} \right) \right)$$

En caso de que la imagen abarque un territorio amplio y cambiante resulta recomendable calcular los coeficientes de correlación y las desviaciones típicas (s_k y s_r) en un entorno cercano al pixel perdido.

Para detectar líneas perdidas se compara la media de los ND de una línea con las medias de las líneas anterior y posterior, para detectar pixeles perdidos se compara el valor de un pixel con los de los 8 pixeles vecinos mediante algún procedimiento de filtrado.

2.7.2. Georreferenciación y corrección geométrica de imágenes de satélite.

Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada; cada pixel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna como los que manejan los programas de tratamiento digital de imágenes.

El proceso de georreferenciación consiste en dar a cada pixel su localización en un sistema de coordenadas estándar (UTM, lambert, coordenadas geográficas) para poder, de este modo, combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG. Tras la georreferenciación se obtiene una nueva capa en la que cada columna corresponde

con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud. En caso de que la imagen no hubiese sufrido ningún tipo de distorsión, el procedimiento sería bastante sencillo, sin embargo, una imagen puede sufrir diversos tipos de distorsiones.

Las correcciones necesarias para transformar en cada punto de la imagen sus coordenadas arbitrarias (fila-columna) en coordenadas reales (X e Y UTM por ejemplo) se explicitan mediante un par de ecuaciones que hacen corresponder a cada pixel par (f,c) un par (X,Y) .

Ecuación 9

$$X = f_1(f, c)$$

Ecuación 10

$$Y = f_2(f, c)$$

La forma y parámetros de estas funciones depende fundamentalmente del tipo de enfoque que se escoja para realizar la georreferenciación. Existen fundamentalmente dos métodos.

El primero, la corrección orbital, modeliza las fuentes de error y su influencia. Para ello es necesario conocer con precisión tanto las características de la órbita del satélite como las del sensor. El segundo es un enfoque empírico que modeliza la distribución de errores en la imagen utilizando puntos de control. El primero es más automático conociendo la información necesaria y las ecuaciones de transformación, aunque falla cuando aparecen errores aleatorios; es el que se suele suministrar cuando los datos se piden georreferenciados. El segundo es más simple en cuanto a su formulación y corrige mejor los errores aleatorios, su inconveniente es que es más trabajoso. El método de los puntos de control no deja de ser un procedimiento de regresión.

a) *Corrección geométrica con Modelos Digitales de Elevaciones.* - Uno de los principales elementos que introducen errores en la georreferenciación son los cambios bruscos de altitud dentro de una imagen. Generalmente puede disponerse

de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), es decir una capa raster que contiene en cada celdilla su valor de altitud.

Puede incorporarse este MDE al proceso de georreferenciación complicando algo más las ecuaciones de transformación:

Ecuación 11

$$X = a_0 + a_1c + a_2f + a_3Z + a_4Zc + a_5Zf$$

Ecuación 12

$$Y = b_0 + b_1c + b_2f + b_3Z + b_4Zc + b_5Zf$$

2.7.3. Corrección atmosférica.

La corrección radiométrica trata de corregir problemas mecánicos en el sensor que generan valores erróneos en píxeles concretos y la corrección geométrica ubica los píxeles en el espacio geográfico corrigiendo las posibles distorsiones. Por su parte la corrección atmosférica trata de evaluar y eliminar las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre.

Por tanto, se va a basar en modelos físicos más complejos que los modelos estadísticos utilizados anteriormente. El primer paso es convertir los Niveles Digitales (ND) almacenados por el sensor en valores de radiancia.

- a) *Conversión de los ND a valores de radiancia.* - Una imagen de satélite en bruto contiene unos valores numéricos denominados niveles digitales (ND) que el satélite obtiene a partir de la energía recibida mediante una ecuación lineal. Para recuperar los valores de energía recibida es necesario aplicar la inversa de esa ecuación lineal.

Ecuación 13

$$L_{sen,k} = a0_k + a1_k ND_k$$

2.8. Clasificación de imágenes

La elaboración de una clasificación del área de estudio en una serie de clases relativas a litología, tipos de vegetación, usos del suelo, etc., es uno de los objetivos fundamentales en teledetección.

La clasificación en teledetección es, por tanto, un caso particular del problema general de clasificar N individuos en un conjunto de K clases en función de una serie de variables cuantitativas (X_1, X_2, \dots, X_n) . Para resolver este problema se necesita una medida de la semejanza o diferencia entre los diferentes individuos y entre los individuos y las clases. Dos individuos muy parecidos pertenecerán probablemente a la misma clase, mientras que dos individuos distintos pertenecerán a diferentes clases. La medida más utilizada es la distancia euclidiana:

Ecuación 14

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{v=1}^n (X_{vi} - X_{vj})^2}$$

Aunque pueden utilizarse otro tipo de distancias. Para estimar los valores de (X_1, X_2, \dots, X_n) para las diferentes clases se utiliza la media aritmética de los valores de los pixels incluidos en la clase.

Puesto que en la práctica no podemos saber con certeza a que clase corresponde cada uno de los pixels, el problema de la clasificación se convierte en un problema de probabilidad de pertenencia a cada una de las clases de un conjunto, por tanto se suelen usar métodos estadísticos.

Suponiendo que los datos han pasado ya todo tipo de correcciones de tipo geométrico o atmosférico, existen dos métodos complementarios para afrontar la definición de clases, estos son válidos tanto en imágenes de satélite como en cualquier otro campo.

- Clasificación no supervisada.
- Clasificación supervisada.

En realidad, suelen utilizarse ambos procedimientos ya que son complementarios. La clasificación supervisada utiliza nuestro conocimiento del terreno, pero si este conocimiento no es perfecto pueden escaparse cosas que una clasificación no supervisada detectaría.

2.8.1. Clasificación no supervisada.

En la clasificación no supervisada no se establece ninguna clase a priori, aunque es necesario determinar el número de clases que queremos establecer, y se utilizan algoritmos matemáticos de clasificación automática. Los más comunes son los algoritmos de clustering que divide el espacio de las variables en una serie de regiones de manera que se minimice la variabilidad interna de los pixeles incluidos en cada región. Cada región de este espacio de variables (ilustración 4) define de este modo una clase espectral.

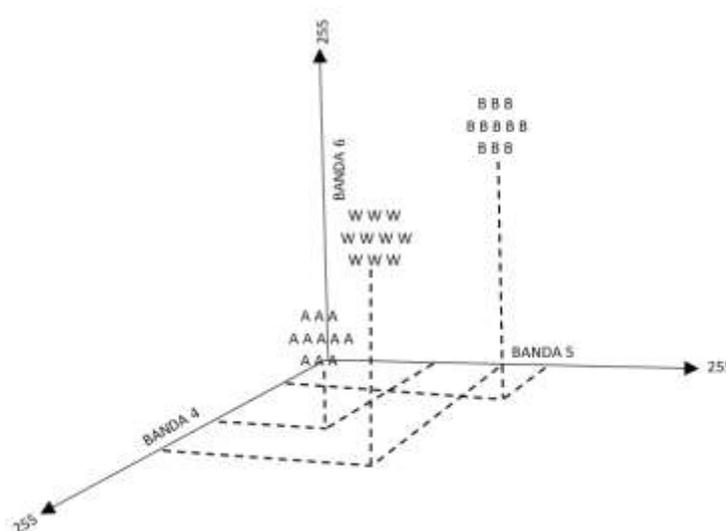


Ilustración 4 Definición no supervisada de clases en el espacio de variables.

Fuente: ingeoexpert.com/articulo/clasificaciones-de-imagenes-de-satelite/

El procedimiento consta de una serie de pasos, en cada paso se identifican los dos individuos más próximos, se hace una clase con ellos y se sustituyen por el centroide de la clase resultante. De este modo cada paso analiza un individuo menos que el anterior ya que los individuos van siendo sustituidos por clases. El proceso se detiene cuando se ha alcanzado un número de clases igual al número de clases que había sido establecido a priori.

El resultado final de un proceso de clustering suele ser un dendrograma (ilustración 5) en el que puede verse como los diversos individuos se aglutinan en clases, primero los que están a una menor distancia (los más parecidos), y como posteriormente las clases se unen entre sí. A partir de un dendrograma podemos elegir el número de clases que queremos mantener en función de diferentes criterios.

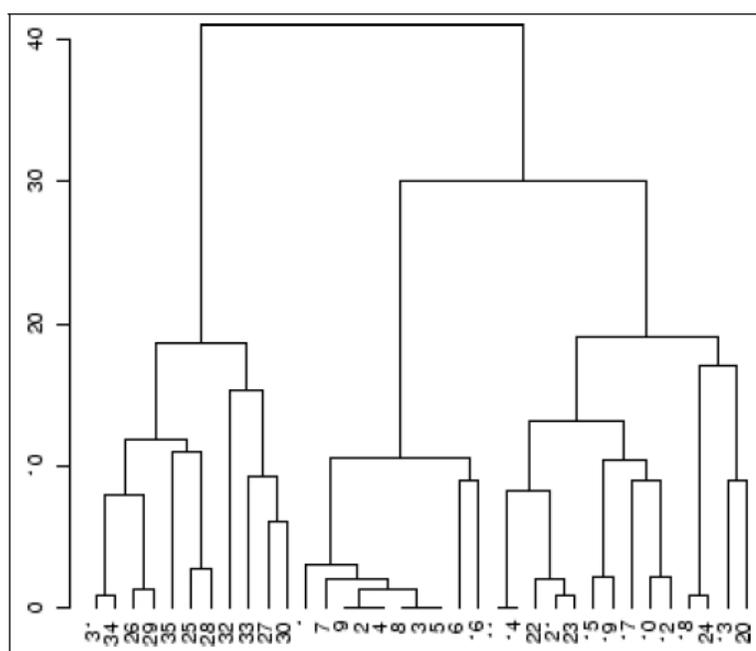


Ilustración 5 Dendrograma obtenido a partir de los pixels de las áreas de entrenamiento.

Fuente: ingeoexpert.com/articulo/clasificaciones-de-imagenes-de-satelite/

Puesto que una imagen de satélite contiene del orden de millones de pixels no tendría sentido hacer un dendrograma completo, ni siquiera utilizar todos los pixeles. En su lugar se establece una muestra con la que se inicia el proceso. El usuario debe decidir a priori con cuantas clases quiere trabajar y el programa parará en el momento que toda la muestra inicial se haya reducido a ese número de clases. El resultado final señala la caracterización de cada una de las clases obtenidas.

2.8.2. Clasificación supervisada.

La clasificación supervisada se basa en la disponibilidad de áreas de entrenamiento. Se trata de áreas de las que se conoce a priori la clase a la que pertenecen y que servirán para

generar una signature espectral característica de cada una de las clases. Se denominan clases informacionales. Estas deben ser áreas lo más homogéneas posibles y en las que sepamos lo que había el día que se tomó la imagen. Por ello esta operación se realiza el mismo día en el que el satélite toma la imagen y luego se compra esta. Otra posibilidad es utilizar fotografía aérea o información de otro tipo.

Obtener las características de reflectividad de cada una de las clases implica una simple consulta a las imágenes (ilustración 6). La respuesta espectral de una clase será la respuesta espectral media de sus pixels.

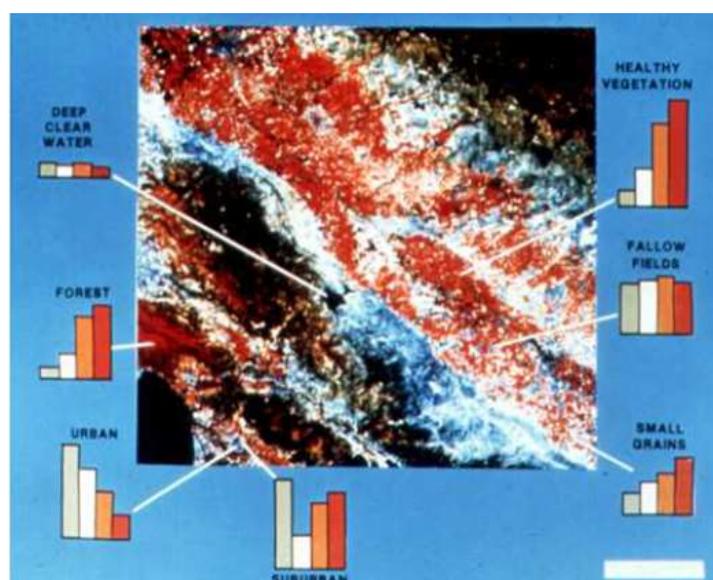


Ilustración 6 Imagen MSS y definición supervisada de clases.

Fuente: ingeoexpert.com/articulo/clasificaciones-de-imagenes-de-satelite/

2.9. Validación. Error de clasificación

Existen dos posibilidades, evaluar una estimación teórica del error en función de las características del algoritmo de clasificación o analizar una serie de áreas test obtenidas del mismo modo que las áreas de entrenamiento. El segundo modo de proceder permite obtener una estimación más realista de los errores mientras la muestra de pixels para la estimación del error sea lo suficientemente grande y representativo.

Un método simple y apropiado de evaluaciones de los errores es utilizar la matriz de confusión de clases tabla 10.

Con este tipo de análisis, se obtiene, no sólo una caracterización del error cometido, sino también una medida sobre la adecuación de las clases consideradas a la realidad y de los parámetros utilizados para caracterizarlas. Puede por tanto utilizarse para definir un nuevo conjunto de clases para realizar una clasificación.

En la tabla aparece un ejemplo de matriz de confusiones, los valores en filas representan las clases reales y en columnas aparecen (en la parte izquierda de la tabla) las clases obtenidas tras la clasificación. Por tanto debe interpretarse como el número de pixels que perteneciendo a la clase fila han sido adjudicados a la clase columna.

En la parte derecha de la tabla aparece: N_i es el número total de pixels de cada clase, el porcentaje de pixels clasificados correctamente para cada clase. $(n_i)_{ci}$ es el número de pixels que correspondiendo a la clase i han sido adjudicados a otras, y $(n_{ic})^i$ es el número de pixels adjudicados a i cuando en realidad pertenecen a otra clase. La última fila presenta la totalización de estos resultados.

Tabla 10 Matriz de confusiones con 6 clases.

	A	B	C	D	E	F	Ni	n_i/N_i	n_{ic}^i	n_{ic}^i
A	50	3	0	0	2	5	60	83.3	10	21
B	4	62	3	0	0	1	70	88.5	8	10
C	4	4	70	0	8	3	86	81.4	19	6
D	0	0	0	64	0	0	64	100.0	0	3
E	3	0	2	0	71	1	78	91.0	6	10
F	10	3	1	3	0	33	50	66.0	17	10
							408	85.8	60	60

2.10. Sistemas de coordenadas en geodesia

2.10.1. Coordenadas Geodésicas.

El sistema de coordenadas geodésicas, es considerado como la descripción de un punto en el espacio tridimensional por medio de la longitud y latitud geodésicas; y la altura elipsoidal, determinando de esta manera la posición de ese punto sobre la superficie terrestre con respecto al elipsoide de referencia.

Las coordenadas geodésicas se las determina sobre un elipsoide de referencia y su uso actualmente va con el apoyo de los sistemas de posicionamiento global (GPS) sus orígenes son producto del análisis geométrico y matemático del elipsoide por lo cual los puntos obtenidos son exactos debido a que el elipsoide es una figura exacta. La latitud geodésica se define como la distancia angular entre la normal del elipsoide del punto de observación y el plano ecuatorial, es decir, la línea del Ecuador. Se mide a partir de este último de 0 grados a 90 grados con un signo positivo en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur.

Por lo tanto, se puede definir que longitud geodésica es la distancia angular comprendida entre el plano ecuatorial y la del meridiano geodésico se mide de 0 grados a 360 grados en sentido positivo hacia el Este. Por motivo de cálculo de longitudes se toma los valores de 0 grados a 180 grados hacia el hemisferio oriental (E) y 0 grados a 180 grados hacia el hemisferio occidental (W). (Escalante, 2010)

2.10.2. Coordenadas Geográficas.

Las coordenadas geográficas se las determinan de una forma independiente de cualquier modelo de aproximación de la tierra, por lo cual no necesitan de un sistema de referencia (elipsoide, datum), solo necesitan dos orígenes como ser meridiano principal (de Greenwich, Paris) y la línea del Ecuador es decir orientaciones cardinales.

La latitud geográfica se define como el ángulo formado por la vertical del lugar con el plano del Ecuador entre una recta perpendicular al geoide de referencia del sitio en cuestión con el Ecuador terrestre. Por lo tanto, la longitud geográfica, es la distancia angular comprendido entre el plano Ecuatorial y la del meridiano de referencia.

2.10.3. Coordenadas Cartesianas.

En la geometría del espacio, las coordenadas cartesianas son los valores que representan la ubicación de un punto en un plano, en relación con los ejes de coordenadas mutuamente perpendiculares, las cuales interceptan un punto u origen en común. El punto se localiza al medir su distancia desde cada eje a lo largo de un paralelo.

Dentro de la geodesia podemos decir que las coordenadas cartesianas son los números reales “x,y,z” representativos de la posición de un punto (P) de la tierra en relación a tres ejes mutuamente perpendiculares que se interceptan en un punto común u origen.

2.11. Qué es la red geodésica

Las Redes Geodésicas consisten básicamente en una serie de puntos distribuidos por toda la superficie de ya sea Urbana o Rural), formando una malla de triángulos, en los cuales, tras un proceso de complejos cálculos post procesos, se conocen sus vértices, a los que se le denominan vértices geodésicos de puntos absolutos.

Las Redes Geodésicas nos definen un conjunto de puntos situados sobre el terreno, dentro del ámbito del territorio estableciendo físicamente mediante monumentos físicos permanentes legalmente establecidos, sobre las cuales se han hecho medidas directas y de apoyo de parámetros físicos, que permiten su interconexión y la determinación de su posición y altura, con relación al sistema de referencia considerada, como ser en este caso a la Red Geodésica mundial ITRF y a las redes regionales como SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) y de manera nacional su enlace de la RED MARGEN (Marco de Referencia Geodésico Nacional) con un sistema de referencia WGS-84 (Sistema Geodésico Mundial del año 1984).

La creación de redes geodésicas es con la idea de regular que todos los proyectos topográficos y cartográficos que se realicen, tanto en dependencias estatales, municipales y empresas descentralizadas de servicios que utilicen el área pública municipal para la dotación de dichos servicios, así como de particulares, queden ligados a un solo sistema de referencia geográfica.

2.12. Categorización de la red geodésica

La cartografía y los proyectos de alta ingeniería requieren ubicarse dentro de un determinado marco de referencia geodésico, que permita definir inequívocamente y con precisión los diversos rasgos y obras de interés; Creándose así la Red Geodésica Nacional.

Red Geodésica Nacional Activa MARGEN (Marco de Referencia Geodésico Nacional), conformada por estaciones establecidas estratégicamente, los cuales registran informaciones satelitales las 24 horas. Durante los 365 días al año.

2.13. La red de operaciones continuas

Es componente del Marco de Referencia Geodésico Nacional (MARGEN), es parte de la Red SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas), que a su vez está enlazado al Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF: International Terrestrial Reference Frame). Además del sistema de referencia geométrico, se ocupa de la definición y representación física de un sistema vertical de referencia basado en alturas elipsoidales y en números geopotenciales. A continuación, se muestra un esquema categorizado de las Redes Geodésicas y a la cual pertenece los puntos geodésicos. (Echalar y Sánchez, 2010)

La Red de Operaciones Continuas del Estado Plurinacional de Bolivia forma parte de esta iniciativa, que es la base para el desarrollo de proyectos comprometidos con la generación y utilización de información georreferenciada en la región, tanto a nivel nacional como internacional. Finalmente cabe señalar que la Red Geodésica se sustenta el Marco de Referencia Terrestre sobre el cual se realizó el trabajo de campo. En la ilustración 7. se muestra un esquema categorizado de las Redes Geodésicas y a la cual pertenece los Puntos Geodésicos.

La Tolerancia de error es de $(-/+ 5\text{mm} + 2\text{ppm} \cdot \text{LB})$, para la categoría B, normativa según el ITRF para Bolivia.



*Ilustración 7 Jerarquía de la Red Geodésica Margen para Bolivia.
Fuente: Marco de Referencia Geocéntrico Nacional.*

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III

3. Materiales y metodología

3.1. Materiales y equipos

Materiales de gabinete. – La investigación se llevará a cabo utilizando una computadora equipada con una variedad de software Microsoft Excel, microsoft word para el análisis geoespacial y el procesamiento de datos, así como el software ENVI 5.3 Arc map 10.5 leica geo office. Además, se dispondrá de acceso a internet para la descarga de información crucial, como imágenes satelitales Landsat, mapas detallados del modelo de elevación digital y mapas que identifiquen los distintos tipos de suelos presentes en la región de estudio.

Material de campo. – South Galaxy G1 GPS GNSS RTK, South S86 GPS GNSS RTK, South S82 GPS GNSS RTK, 2 tripode, 3 baterías, libreta de apuntes, flexometro, vehículo para logística.



Ilustración 8 Imágenes de los equipos.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Metodología de variables

3.1. Modelación de variables

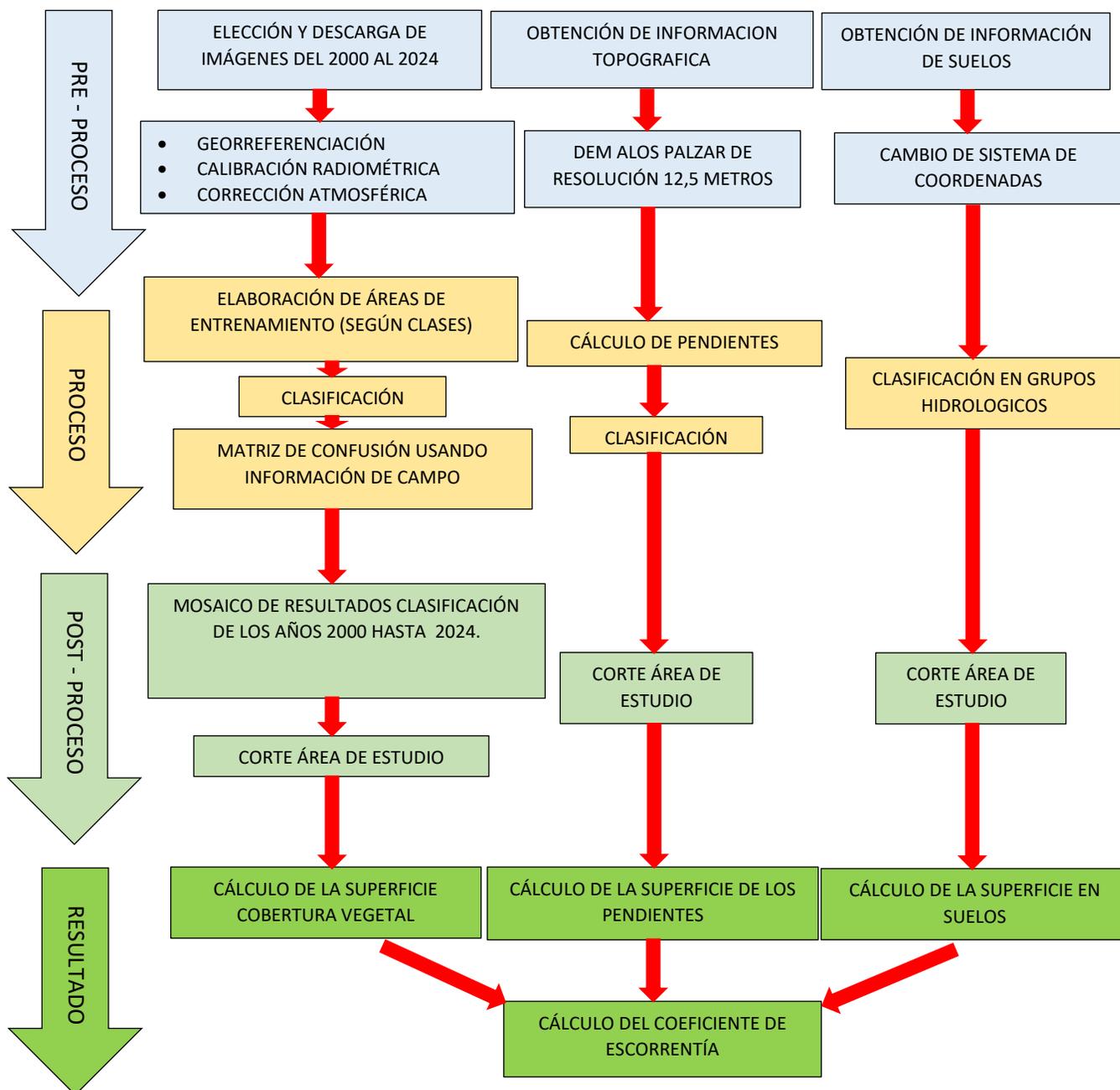


Ilustración 9 Modelación de Variables.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Variables

3.3.1. Cuenca la Vitoria.

La cuenca hidrográfica del río Vitoria limita al norte con la cuenca del río Erquís, al este con la reserva biológica de la cordillera de Sama, al sur con la cuenca del río Tolomosa y finalmente desemboca al oeste en el río Guadalquivir.

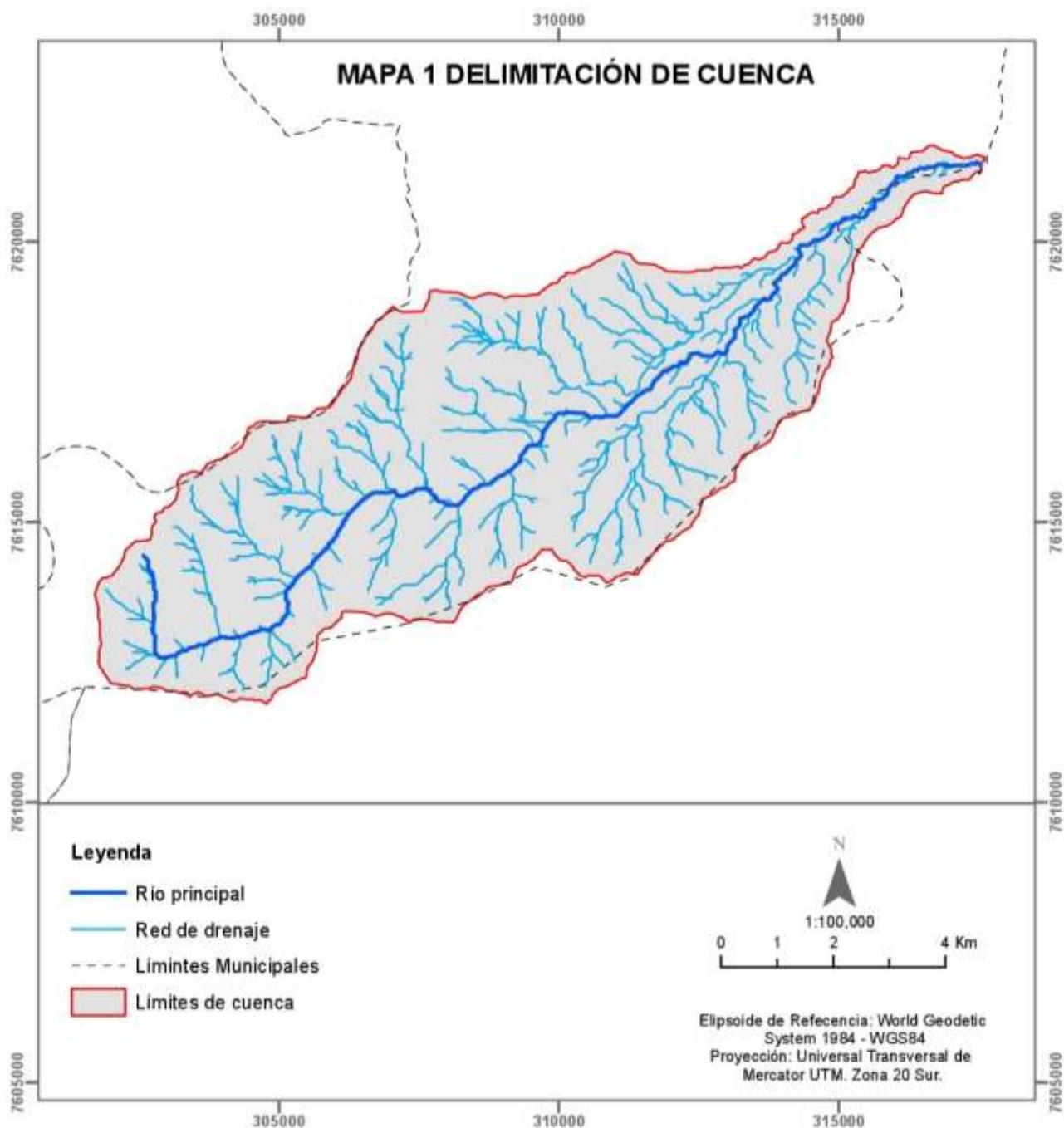


Tabla 11 Características morfométricas de la cuenca

Características morfo métricas de la cuenca		
Descripción	Unidad	Cuenca Vitoria
Área de cuenca	Km ²	60.63
Clasificación de tamaño	-	Pequeña
Perímetro de cuenca	km	45.43
Pendiente de la cuenca	%	48.479
relación de relieve	-	0.128
Altura máxima de la cuenca	m.s.n.m.	4272
Altura media de la cuenca	m.s.n.m.	2826.46
Altura mínima de la cuenca	m.s.n.m.	1962
Longitud de cause	km	23.01
Pendiente de río	%	9.626
Orden de ríos	-	5

Fuente: Elaboración propia.

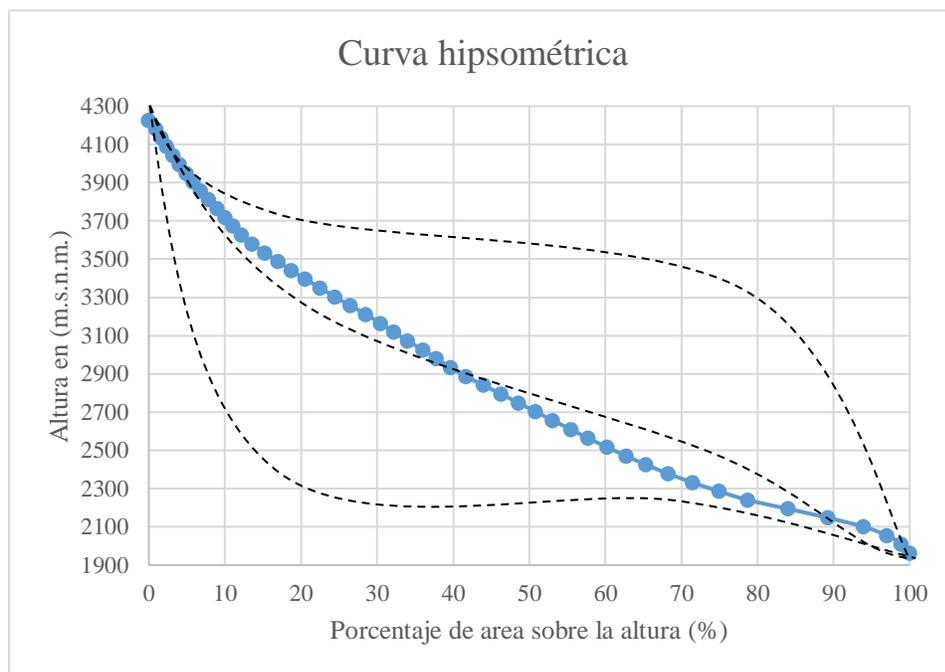


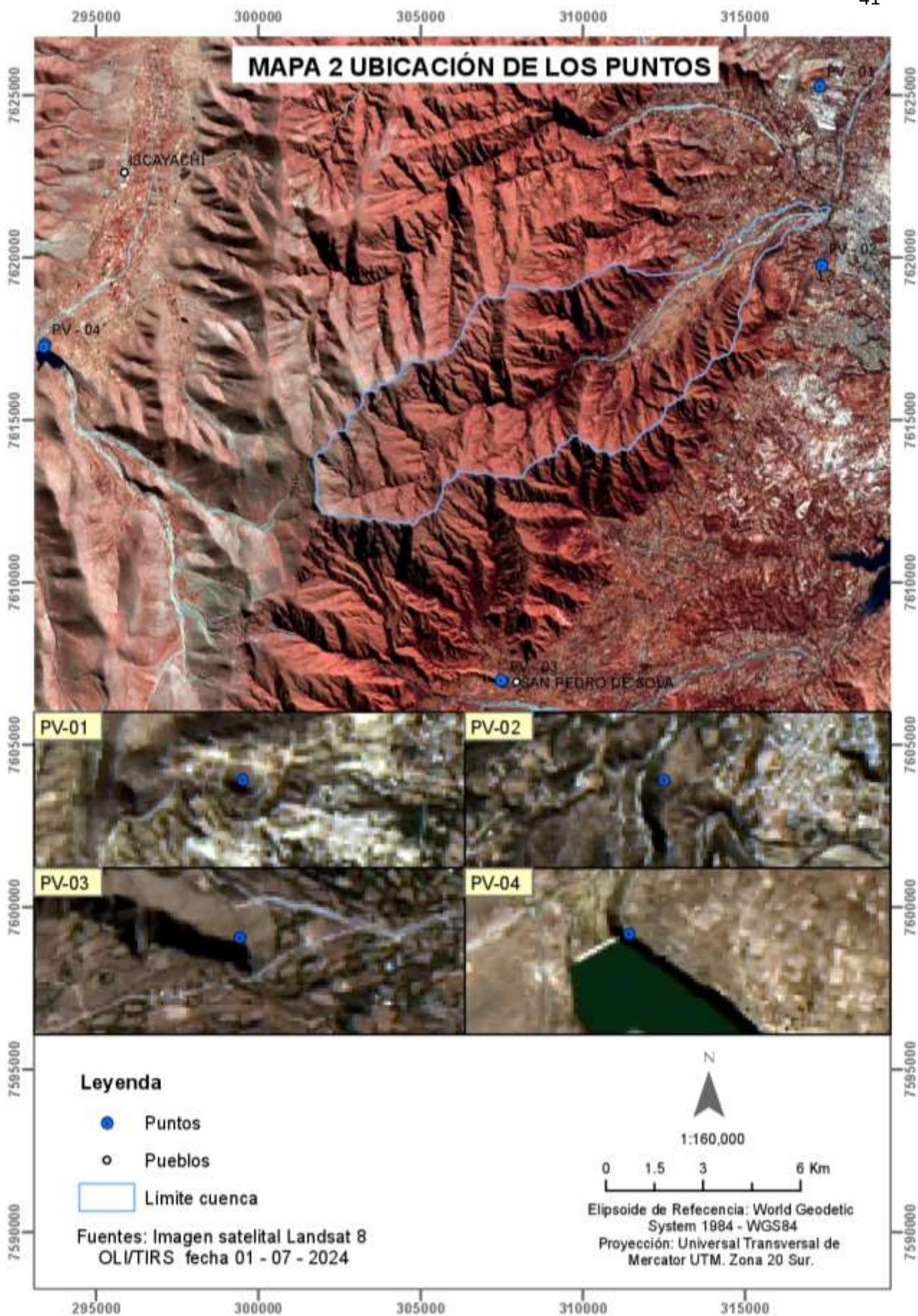
Ilustración 10 Curva hipsométrica.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Puntos de georreferenciación.

Elección de puntos

La elección de puntos de georreferenciación es clave para lograr precisión espacial en las imágenes satelitales. Estos puntos deben ser visibles y estables tanto en el terreno como en la imagen (por ejemplo, cruces de carreteras o edificios grandes), evitando elementos temporales que pueden cambiar. Para minimizar distorsiones, se recomienda una distribución uniforme de puntos en toda el área y, si es posible, incluir puntos en diferentes altitudes para corregir variaciones de elevación, especialmente en terrenos montañosos. Tomando en consideración se realizó la elección de cuatro puntos bien distribuidos.



Recopilación de datos

Se recopila información de se realizó la fecha 9 y 10 de septiembre, siguiendo los siguiendo las normativas, tomando sesiones de más de 45 minutos en cada punto geodésico.



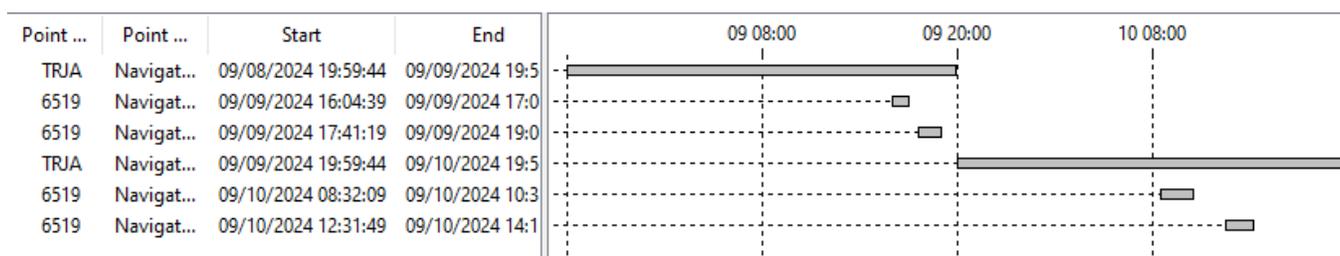
Ilustración 11 Equipos GNSS en el campo.

Fuente: Elaboración propia.

Procesamiento de datos

Estos datos se descargan al software Leica Geo Office 5.0, donde se configura el proyecto definiendo el sistema de coordenadas y parámetros necesarios. Luego, se realiza el ajuste de observaciones mediante el método de mínimos cuadrados para obtener coordenadas absolutas precisas. Posteriormente, los datos ajustados se validan, se corrigen posibles errores y se exportan las coordenadas en sistemas globales o locales como WGS84 o UTM. Finalmente, se elaboran tablas 12 y 13 de con las coordenadas absolutas, mapas georreferenciados y un informe en anexos que documenta el procedimiento, los resultados y su precisión, asegurando la calidad y trazabilidad del trabajo realizado.

Ilustración 12 Pos-proceso en Leyca Geo Office.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12 Coordenadas U.T.M.

COORDENADAS U.T.M.							
Id Punto	Clase Punto	Coordenada Este	Coordenada Norte	Altura Epsoidal	Altura Ortométrica	Ondulación Geoidal	Día Juliano
TRJA	Control	322245.699	7616059.425	1887.179	1848.151	39.028	253-254
PV-01	Ajustado	317347.850	7619733.800	2009.072	1972.643	36.429	253
PV-02	Ajustado	317299.656	7625269.091	2108.536	2071.975	36.561	253
PV-03	Ajustado	293398.413	7617257.858	3607.812	3568.459	39.353	254
PV-04	Ajustado	307489.173	7606985.827	2180.896	2143.572	37.324	254

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13 Coordenadas Geodesicas.

COORDENADAS GEODÉSICAS							
Id Punto	Clase Punto	Latitud	Longitud	Altura Epsoidal	Altura Ortométrica	Ondulación Geoidal	Día Juliano
TRJA	Control	21° 32' 58.13792"	64° 42' 59.46981"	1887.179	1848.151	39.028	253-254
PV-01	Ajustado	21° 30' 56.90378"	64° 45' 48.23584"	2009.072	1972.643	36.429	253
PV-02	Ajustado	21° 27' 56.92848"	64° 45' 47.74135"	2108.536	2071.975	36.561	253
PV-03	Ajustado	21° 32' 08.02095"	64° 59' 41.35775"	3607.812	3568.459	39.353	254
PV-04	Ajustado	21° 37' 47.61000"	64° 51' 36.03749"	2180.896	2143.572	37.324	254

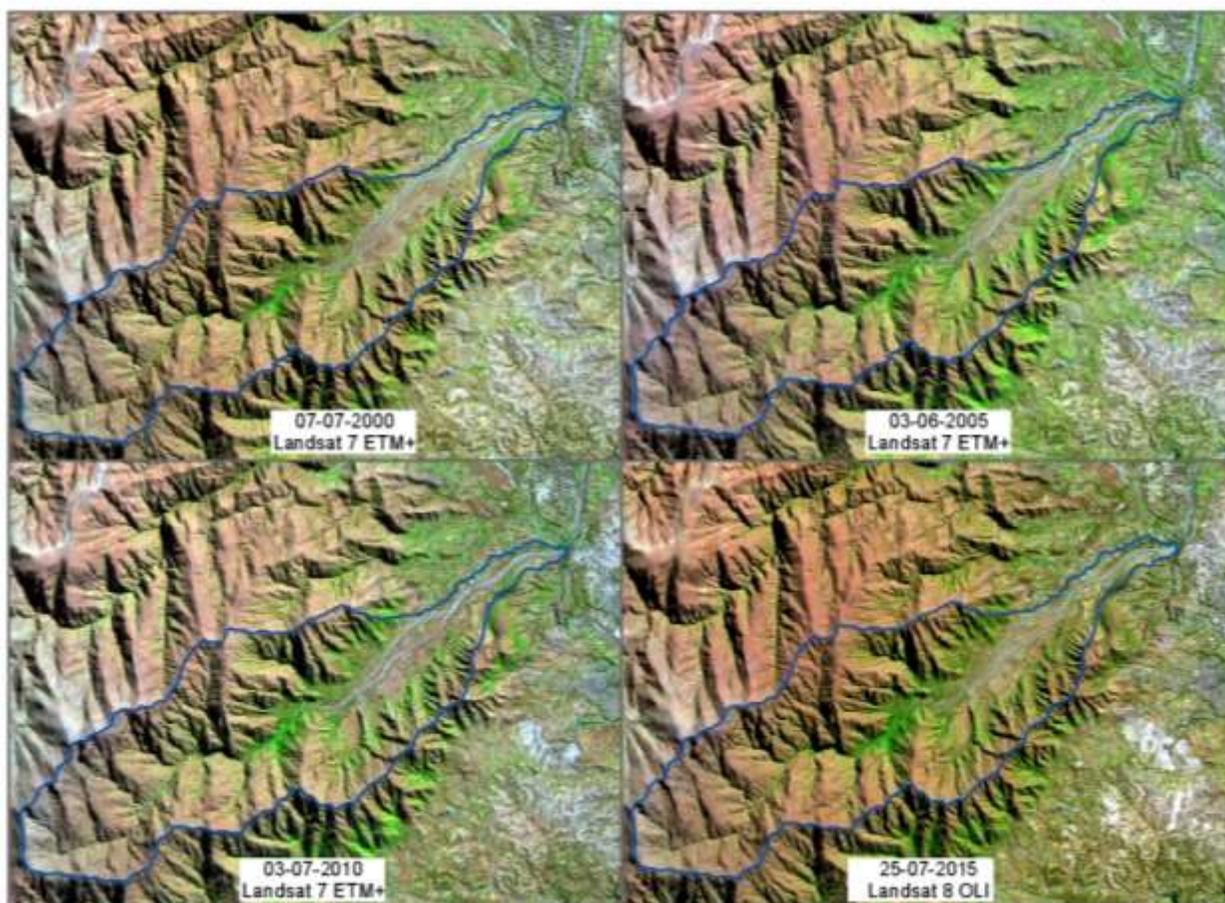
Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Cobertura vegetal.

Imágenes satelitales

Los datos satelitales utilizados en esta investigación fueron descargados desde la plataforma Earth Explorer , gestionada por el USGS en colaboración con la NASA . Esta plataforma ofrece acceso a uno de los archivos más extensos y continuos de datos de teledetección terrestre, principalmente provenientes de los satélites Landsat . Disponible en Earthexplorer.usgs.gov , Earth Explorer proporciona una interfaz intuitiva para la selección de imágenes satelitales . En este estudio, se aplican diversos criterios de búsqueda, como rango de fechas, porcentaje de nubosidad, y tipo de satélite, para identificar las imágenes más adecuadas y de mejor calidad visual. Específicamente, se seleccionan imágenes representativas cada cinco años en el período comprendido entre 2000 y 2024, asegurando que estas reflejaran las condiciones más favorables para el análisis, como se muestra en el ilustración 13.

Ilustración 13 Imagenes Satelitales.





Fuente: Elaboración propia

Georreferenciación, calibración radiométrica y corrección atmosférica de imágenes

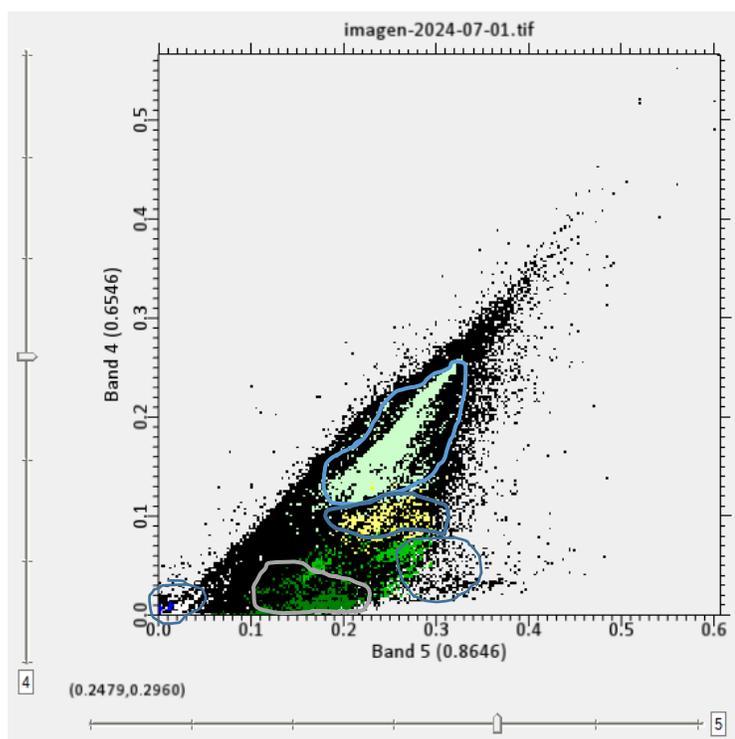
Las imágenes satelitales Landsat utilizadas en este estudio fueron georreferenciadas utilizando los puntos geodésicos obtenidos en campo y previamente posprocesados, lo que permitió asegurar que las imágenes se alinearan correctamente con el sistema de coordenadas utilizadas en esta investigación. Además, se realizaron las calibraciones radiométricas y correcciones atmosféricas necesarias para mejorar la precisión de las imágenes utilizando el software ENVI, corrigiendo distorsiones causadas por la atmósfera y el movimiento del satélite. Como paso adicional, se llevó a cabo una mejora en la resolución espacial de las imágenes, disminuyendo el tamaño de píxel de 30 metros a 15 metros mediante un proceso de remuestreo, lo cual permitió una mayor precisión en el análisis y mejoró la detección de detalles a nivel de superficie.

Clasificación

Con base en las imágenes satelitales Landsat obtenidas, se llevó a cabo una clasificación supervisada para identificar y categorizar las áreas en cinco clases principales: sin vegetación, cultivos, vegetación ligera, hierbas y vegetación densa. Para ello, se seleccionaron muestras de entrenamiento representativas de cada clase, las cuales fueron utilizadas para entrenar el clasificador y asignar los píxeles de la imagen a las categorías correspondientes. Posteriormente, se realizó una evaluación de la precisión de la clasificación mediante el uso de muestras de validación, utilizando métricas como la

matriz de confusión para cuantificar la exactitud de los resultados. Esta evaluación permitió garantizar que las clases fueron asignadas correctamente y que la clasificación reflejaba de manera precisa las características de la superficie terrestre. Finalmente, se aplicarán algunos procesos de post-procesamiento para refinar los resultados y mejorar la calidad de la clasificación, asegurando un análisis detallado y confiable de la cobertura vegetal en la zona de estudio.

Ilustración 14 Diagrama de clasificación.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Pendiente del terreno.

Obtención de Modelo de Elevación Digital (DEM)

El satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite) de JAXA, equipado con el sensor PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), permite la obtención de Modelos Digitales de Elevación (DEM) de alta resolución (12,5 m). El sensor PALSAR utiliza radar de apertura sintética en banda L, ideal para captar información topográfica incluso a través de nubes o en condiciones de poca luz, lo cual

es útil para estudiar terrenos en zonas remotas y boscosas. Los DEM generados por ALOS PALSAR son fundamentales para aplicaciones en hidrología, gestión de desastres y planificación territorial.

Procesamiento

Se realizó un procedimiento para generar el mapa de pendientes. Primero, se utilizó la herramienta pendiente dentro de ArcGIS para calcular la inclinación del terreno en función de las elevaciones presentes en el DEM. El resultado fue un mapa que muestra la variabilidad de las pendientes en el área, donde se representaron distintas categorías de inclinación. Posteriormente, se llevó a cabo una clasificación de las pendientes en diferentes clases de pendientes llano, suave, accidentado y escarpado, lo que permitió realizar un análisis más detallado de las características del terreno. Este proceso facilita la interpretación del relieve para esta investigación.

3.3.5. Tipo de suelo.

El Proyecto de Zonificación Agroecológica y Establecimiento de una Base de Datos y Red de Sistema de Información Geográfica en Bolivia (ZONISIG) durante el periodo 1993-2001, respaldado por el Gobierno de los Países Bajos en colaboración con el Gobierno de Bolivia, proporciona datos temáticos integrales en diversas áreas como suelos, vegetación, clima, hidrología e hidrogeología, aspectos socioeconómicos, entre otras.

Información de suelos en tarja esta según la clasificación de la FAO (1990). Las fuentes fueron de elaboración propia del proyecto ZONISIG en base del mapa de las unidades de terreno y trabajo de campo.

Proyección

Para la información de los mapas se utilizó la proyección UTM zona 20S, esferoide internacional y datum Provisional South American Datum 1956 (PSAD56), en la presente investigación se tuvo que re proyectar a UTM zona 20S pero con datum World Geodetic System 1984 (WGS 84).

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV

4. Resultados

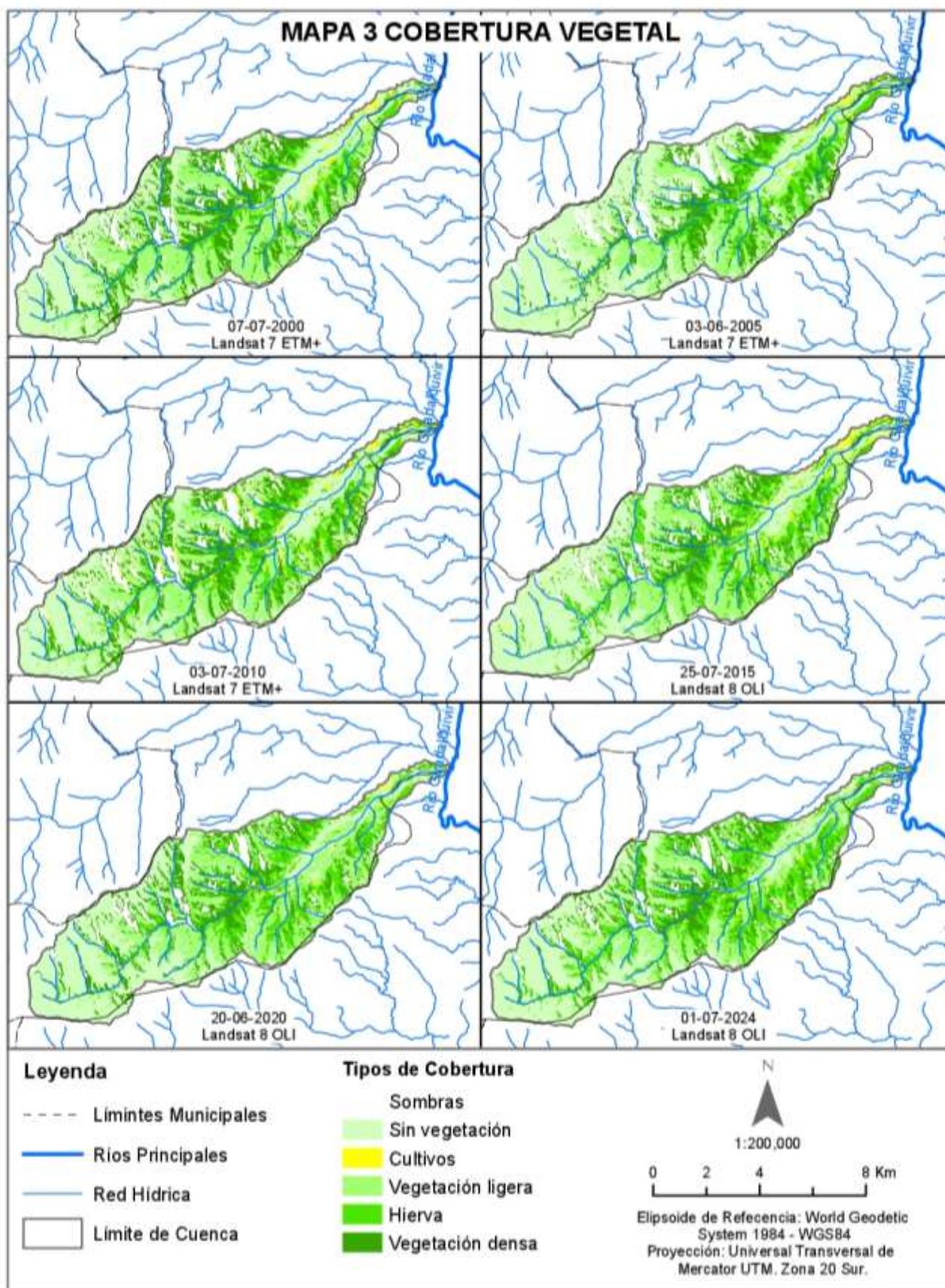
4.1. Cobertura vegetal

A partir de la metodología de procesamiento de imágenes satelitales, se derivaron mapas detallados y una tabla 14 que resume exhaustivamente los diferentes tipos de cobertura presentes en la cuenca, junto con sus respectivas extensiones. Estos productos cartográficos constituyen un reflejo preciso y visual de la distribución de la cobertura vegetal en la zona de estudio. Además de la representación espacial, la tabla proporciona un desglose detallado de las categorías de cobertura y sus proporciones relativas en la cuenca.

Tabla 14 Clasificación de cobertura vegetal.

Años	Clasificación área km ²					
	2000	2005	2010	2015	2020	2024
Sin vegetación	22.964	28.261	21.231	22.561	21.673	20.432
Cultivos	0.737	0.663	2.086	1.661	0.830	0.586
Vegetación ligera	14.636	11.216	12.419	13.990	14.933	12.958
Hierva	5.280	6.253	8.718	10.997	10.412	14.438
Vegetación densa	12.845	9.290	11.460	7.248	9.047	8.546

Fuente: Elaboración propia.



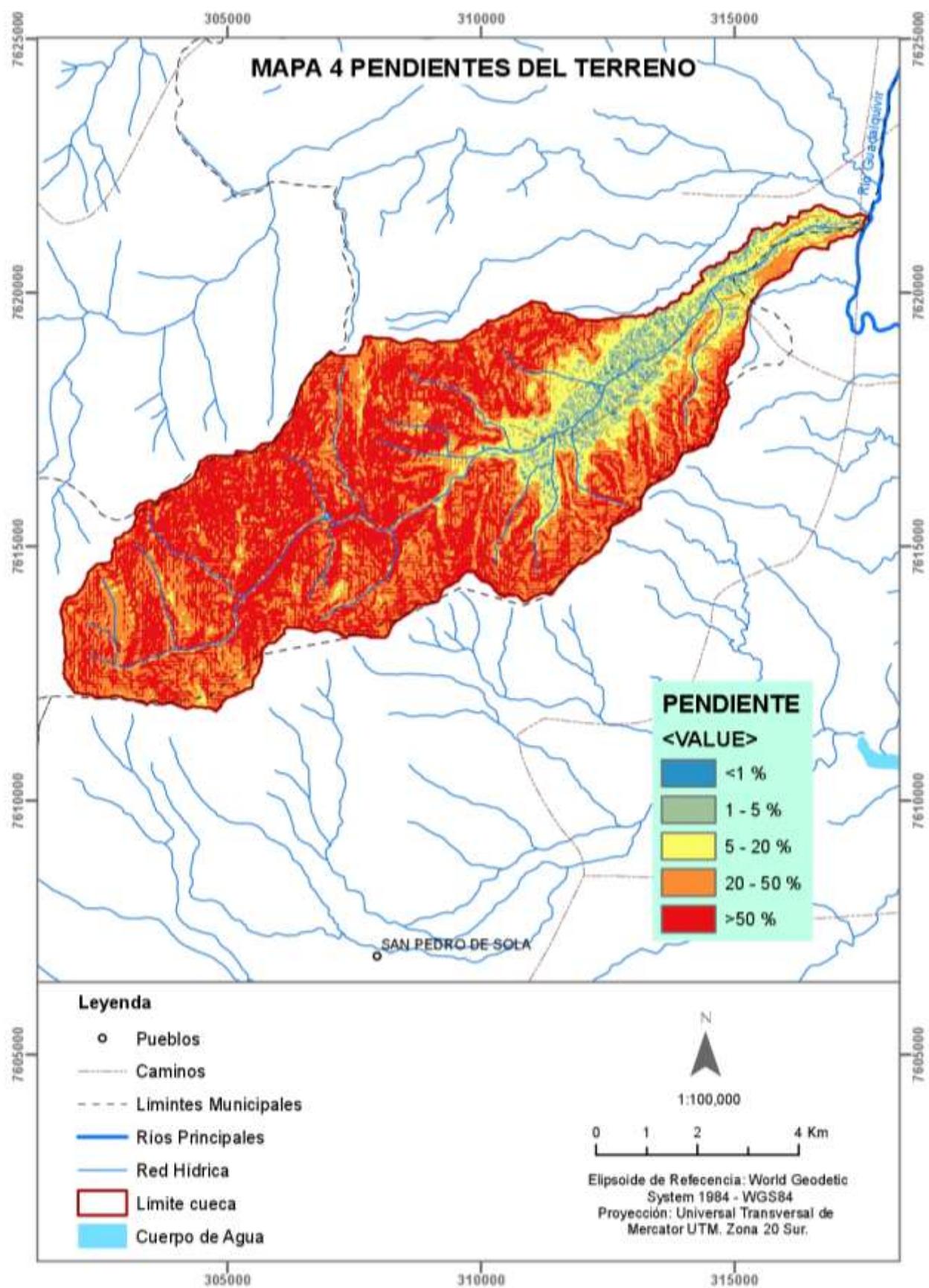
4.2. Pendientes de terreno

La topografía de la cuenca revela una relativa estabilidad en las modificaciones de pendientes, aspecto que no requiere una consideración para los propósitos específicos de esta investigación. En consecuencia, se procedió a la generación de un mapa detallado que ilustra las pendientes, y una tabla 15 que presenta una clasificación. Este enfoque clasificatorio resultará pertinente en la obtención precisa de los coeficientes de escorrentía.

Tabla 15 Clasificación de pendientes.

Clasificación	Pendientes	Área km ²
Despreciable	< 1%	0.384
Suave	1-5%	3.725
Media	5-20%	7.634
Alta	20-50%	20.744
Pronunciada	>50%	28.132

Fuente: Elaboración propia.



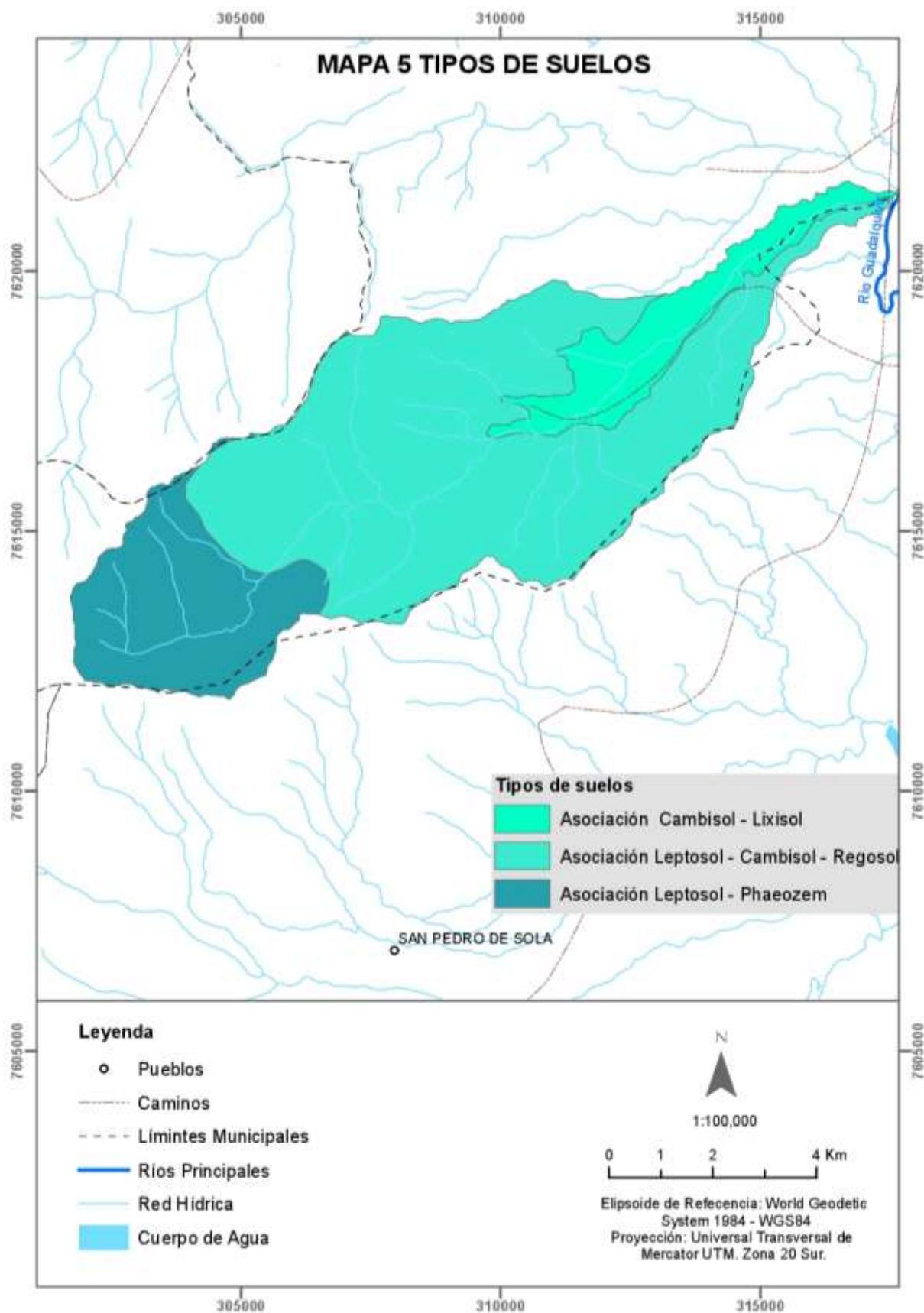
4.3. Tipos de suelos

La recolección de datos sobre el suelo en la cuenca se llevó a cabo mediante la consulta de estudios anteriores, contribuyendo significativamente a esta investigación. Estos estudios anteriores proporcionaron información valiosa que ha permitido la generación de un mapa detallado y una tabla 16 que condensa los diversos tipos de suelos presentes en la cuenca, junto con sus respectivas extensiones territoriales. Estas representaciones en mapas cartográficas y la tabla ofrecen una visión del tipo de suelo en la zona de estudio, para el análisis detallado de la interacción del coeficiente de escorrentía.

Tabla 16 Clasificación de los tipos de suelos.

Tipos de Suelos	Grupo Hidrológico			km ²
Asociación Leptosol - Phaeozem	D	B		12.326
Asociación Leptosol - Cambisol - Regosol	D	B	B	41.414
Asociación Cambisol - Lixisol	B	C		6.895

Fuente: Elaboración propia.



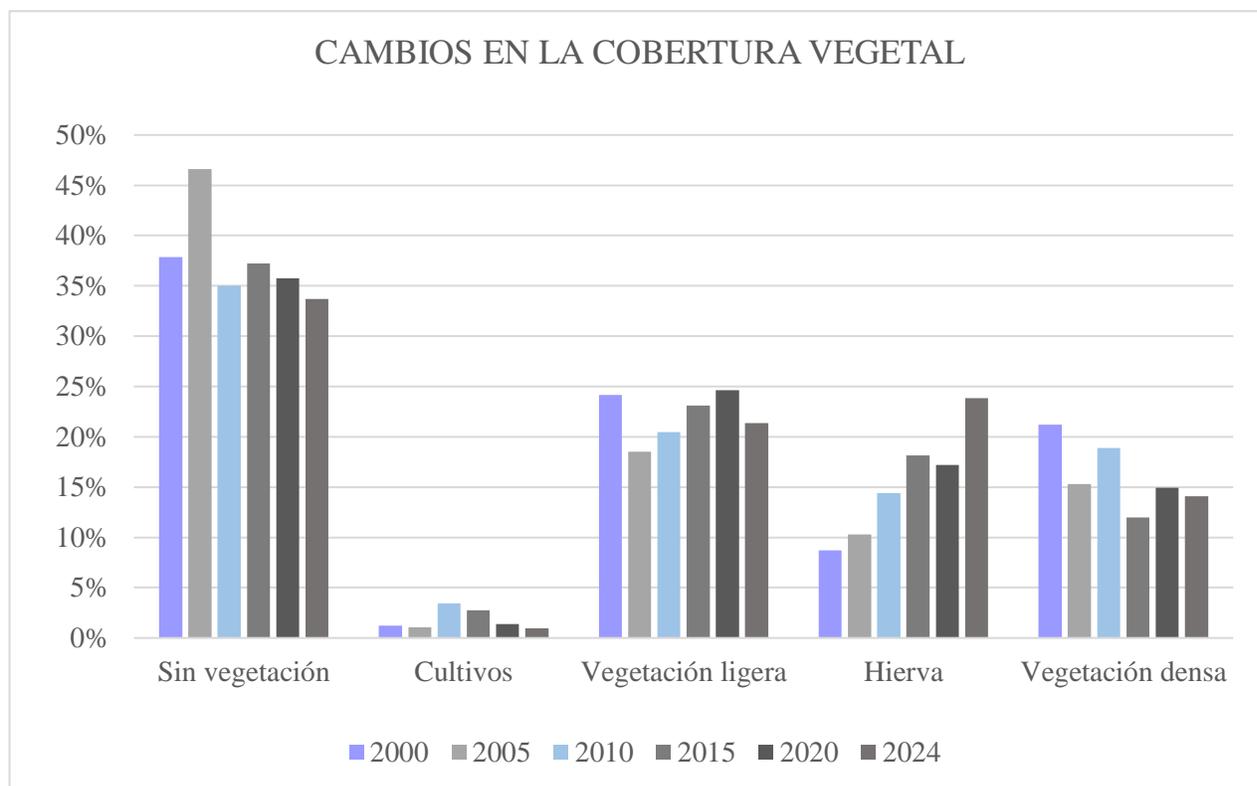
4.4. Análisis multitemporal de cobertura

La cobertura vegetal, siendo la variable central en esta investigación, se exponen a través de los resultados obtenidos en el proceso de creación de un mapa representativo de la cuenca. Los hallazgos se presentan de manera detallada en forma de gráficos que ilustran las variaciones a lo largo del período de estudio. Estos gráficos no solo proporcionan una visualización efectiva de la evolución de la cobertura vegetal, sino que también permiten identificar patrones y tendencias significativas a lo largo del tiempo. Este enfoque gráfico contribuye a una comprensión más profunda de las dinámicas y cambios en la cobertura vegetal, facilitando así la interpretación de los resultados de la investigación.

Tabla 17 Análisis multitemporal.

	Landsat 7 ETM+			Landsat 8 OLIS		
	2000	2005	2010	2015	2020	2024
Sin vegetación	37.88%	46.62%	35.02%	37.22%	35.75%	33.70%
Cultivos	1.22%	1.09%	3.44%	2.74%	1.37%	0.97%
Vegetación ligera	24.14%	18.50%	20.49%	23.08%	24.63%	21.38%
Hierva	8.71%	10.32%	14.38%	18.14%	17.18%	23.82%
Vegetación densa	21.19%	15.33%	18.90%	11.96%	14.92%	14.10%
Coeficiente C_{pond}	0.514	0.535	0.511	0.519	0.513	0.507

Fuente: Elaboración propia.



*Ilustración 15 Cambio de cobertura vegetal.
Fuente: Elaboración propia.*

CAPÍTULO V

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

La utilización de imágenes Landsat del periodo 2000-2024, con intervalos de análisis de 5 años, se llevó a cabo mediante la implementación de metodologías consolidadas basadas en teledetección. Se prestó especial atención a procesos cruciales como la georreferenciación, corrección y calibración, los cuales fueron realizados con software especializado y datos confiables obtenidos en campo. Estas fases críticas aseguraron la confiabilidad y consistencia de los datos, mejorando las imágenes para un análisis multitemporal detallado. El cuidadoso tratamiento de las imágenes no solo garantizó la precisión de los resultados, sino que también sentó las bases para una interpretación confiable de los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del extenso período considerado.

La implementación de puntos de control geodésicos para la georreferenciación de las imágenes, basada en una metodología previamente establecida, permitió recopilar información valiosa mediante exploraciones en el terreno, asegurando una ubicación correcta de los mapas. Durante las salidas de campo, se realizó un riguroso control para identificar puntos claramente visibles en las imágenes satelitales, facilitando así la correcta identificación de las zonas de estudio.

La comparación de la clasificación de la cobertura vegetal entre los años 2000 y 2024 reveló transformaciones significativas, especialmente en la categoría "sin vegetación". En el año 2005, esta categoría alcanzó su máximo de 46.62% de la superficie, mostrando en los periodos posteriores una tendencia gradual a la reducción, hasta llegar al 33.7%. Los cultivos mantuvieron bajas extensiones de producción, oscilando entre el 0.97% y el 3.44% de la superficie de la cuenca. Por otro lado, la vegetación ligera presentó cambios moderados a lo largo del período, fluctuando entre el 18.5% y el 24.63%, mientras que la cobertura de hierbas mostró una clara tendencia al aumento, pasando del 8.71% al 23.82%. En contraste, la categoría de vegetación densa experimentó una ligera disminución de los 21.19% a la actualidad 14.1% del período de estudio. Estos cambios

ofrecen una visión detallada de las dinámicas evolutivas de la cobertura vegetal en la región, resaltando la importancia de analizar los factores subyacentes que han influido en estas variaciones a lo largo del tiempo.

La estimación de los coeficientes de escorrentía durante el periodo 2000-2024, considerando las variables de vegetación y las constantes de pendiente y tipo de suelo en la cuenca, revela una relación directamente proporcional con los cambios en la cobertura vegetal de la zona de estudio. Este análisis sugiere que las transformaciones relativamente limitadas en la cobertura vegetal han tenido un impacto moderado en los coeficientes de escorrentía dando valores de 0.535 máximo y mínimo de 0.507, casi no impactando en la dinámica hidrológica de la cuenca.

5.2. Recomendaciones

La selección y ubicación de los puntos de control para la georreferenciación se llevó a cabo siguiendo una metodología específica que garantizara la obtención de puntos geodésicos de alta precisión. Se priorizó la identificación de ubicaciones estratégicas que facilitarían su visibilidad en las imágenes satelitales y permitirían una georreferenciación precisa. Uno de los principales desafíos fue la dificultad de acceso a algunas regiones, así como las complicaciones asociadas a las lecturas de los equipos y las distancias entre los distintos puntos distribuidos alrededor de la cuenca.

Durante el proceso de clasificación, existe un riesgo significativo de confusión entre las distintas clases, especialmente al trabajar con un rango amplio de categorías. En este contexto, la cuidadosa selección de áreas de entrenamiento se convierte en un componente clave para garantizar que el modelo de clasificación se ajuste con precisión a las características específicas de cada clase. Es importante destacar que, al abarcar categorías muy extensas, la precisión del proceso puede verse comprometida. Por ello, se recomienda definir el alcance de las clasificaciones con prudencia, priorizando siempre la calidad y la exactitud sobre la amplitud del rango.

Durante el cruce de variables relacionadas con la cobertura vegetal, la pendiente y el tipo de suelo para la estimación del coeficiente de escorrentía, se emplearon herramientas GIS para optimizar la metodología. Se asignó un código a cada variable, lo que facilitó el

cruce de datos. Este proceso resultó crucial, ya que permitió asignar valores específicos de coeficientes de escorrentía basados en las tablas de Lemus & Navarro. La integración de estas variables interconectadas es fundamental para garantizar que los valores asignados se reflejen con precisión.