

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL Y LA  
DEGRADACIÓN EN LA EXTENSIÓN DE LA COBERTURA DE PÁRAMO –  
SUBCUENCA SAN JOSÉ - PÁRAMO EL RABANAL**

**DUVAN ARLEY AREVALO PARRA  
JUAN CAMILO DUARTE SANDOVAL**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INGENIERÍA CIVIL  
TUNJA  
2021**

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL Y LA  
DEGRADACIÓN EN LA EXTENSIÓN DE LA COBERTURA DE PÁRAMO –  
SUBCUENCA SAN JOSÉ - PÁRAMO EL RABANAL**

**DUVAN ARLEY AREVALO PARRA  
JUAN CAMILO DUARTE SANDOVAL**

**Proyecto de grado (tesis de pregrado) presentado como requisito para  
obtener el título de Ingeniero civil**

**Directora de tesis:  
Ingeniera Laura Natalia Garavito Rincón**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
INGENIERIA CIVIL  
TUNJA  
2021**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Tunja, 8 de marzo de 2021.

## DEDICATORIA

El presente proyecto de grado está dedicado a nuestras familias, por el constante apoyo y amor incondicional.

Duvan Arley y Juan Camilo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias, por el apoyo incondicional en el desarrollo de todas las actividades relacionadas con este proyecto, así como en la culminación de este proceso académico. Sin el amor, el apoyo y la motivación de ellos, jamás lo hubiésemos logrado.

Hacemos un agradecimiento especial a la Ingeniera Laura Natalia Garavito Rincón, nuestra directora de tesis, por su empeño, acompañamiento y liderazgo en este proceso. Además de sus contribuciones en nuestro crecimiento profesional y personal.

## CONTENIDO

	pág
GLOSARIO	11
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	17
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
3. JUSTIFICACIÓN	20
4. ESTADO DEL ARTE	22
5. MARCO TEORICO	29
5.1 PÁRAMO	29
5.1.1 Normativa.	30
5.2 TELEDETECCIÓN	32
5.3 IMÁGENES SATELITALES TIPO LANDSAT	32
5.4 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES TIPO LANDSAT	34
5.4.1 Corrección radiométrica	34
5.4.2 Corrección geométrica	35
5.4.3 Combinación de bandas	35
5.4.4 Clasificación no supervisada	35
5.5 ÍNDICES DE VARIABILIDAD PARA ESTIMAR LA DEGRADACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL	35
5.5.1 Índice de vegetación remanente (IVR)	35
5.5.2 Indicador de las tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra	36
5.5.3 Tasas anuales de cambio	37

6. MATERIALES Y MÉTODOS	38
6.1 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	38
6.2 MATERIALES Y HERRAMIENTAS	38
6.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	38
6.3.1 Análisis a través del tiempo de la cobertura vegetal	39
6.4 Metodología del plan de manejo ambiental	42
7. DESARROLLO DEL PROYECTO	44
7.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	44
7.2 DELIMITACION DE LA CUENCA SAN JOSE MEDIANTE ARCMAP	44
7.3 ANÁLISIS DE LA COBERTURA VEGETAL A TRAVÉS DEL TIEMPO	45
7.3.1 Corrección atmosférica	47
7.3.2 Corrección radiométrica	48
7.3.3 Clasificación no supervisada	49
7.3.4 Clasificación supervisada	53
7.4 ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL	53
7.4.1 Tasa anual de cambio para la cobertura vegetal cuenca San José	55
7.4.2 Tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra (TCCN)	56
7.4.3 Indicador de vegetación remanente.	57
8. PLAN DE RESTAURACION ECOLOGICA EN ZONAS DEGRADADAS	60
8.1 MAPA DE ZONAS DE INTERVENCIÓN	60
8.2 SELECCIÓN DE ESPECIES	61
9. CONCLUSIONES	63
10. ANEXOS	65
11. BIBLIOGRAFÍA	76

## LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Bandas espectrales según el tipo de satélite	33
Tabla 2. Elementos detectados con combinaciones de bandas.	33
Tabla 3. Combinaciones de banda y representación en la zona de estudio.	50
Tabla 4. Análisis multitemporal cuenca San José 1986 - 2020	54
Tabla 5. Tasas anuales de cambio de la cobertura vegetal cuenca San José.	55
Tabla 6. Comparación de las tasas anuales de cambio de las áreas de coberturas vegetales	55
Tabla 7. Tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra (TCCN) 1986 – 2020	56
Tabla 8. Categorización de las tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra	57
Tabla 9. Indicador de vegetación remanente (IVR) 1986	57
Tabla 10. Indicador de vegetación remanente (IVR) 2020	58
Tabla 11. Indicadores del índice de vegetación remanente	58
Tabla 12. Especies seleccionadas para restaurar zona de vegetación de paramo	61
Tabla 13. Especies seleccionadas para restaurar zona de Bosque nativo	61
Tabla 14. Especies seleccionadas para restaurar zona de Arbustal bajo	62

## LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Flujograma de la metodología del procesamiento de imágenes.	41
Figura 2. Flujograma plan de manejo ambiental	43
Figura 3. Localización de la zona de estudio	46
Figura 4. Corrección atmosférica en imagen Landsat con ENVI	47
Figura 5. Imagen Landsat 7 SLC Off, antes y después del GapFill	48
Figura 6. Corrección radiométrica en imagen Landsat con ENVI.	47
Figura 7. Clasificación no supervisada con tipos de cobertura	48
Figura 8. Extracción de zona de estudio mediante la herramienta “Clip”	52
Figura 9. Comparación de imagen con clasificación supervisada.	53
Figura 10. Variación de la cobertura vegetal, período 1986 – 2020	54

## LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. Mapa de la cobertura vegetal para el año 1986	65
Anexo B. Mapa de la cobertura vegetal para el año 1992	66
Anexo C. Mapa de la cobertura vegetal para el año 2000	67
Anexo D. Mapa de la cobertura vegetal para el año 2007	68
Anexo E. Mapa de la cobertura vegetal para el año 2015	69
Anexo F. Mapa de la cobertura vegetal para el año 2020	70
Anexo G. Cambio de cobertura a través del tiempo para Bosque Mixto	71
Anexo H. Cambio de cobertura a través del tiempo para Vegetación de páramo	72
Anexo I. Cambio de cobertura a través del tiempo para Arbustal bajo	73
Anexo J. Cambio de cobertura a través del tiempo para Pastos	74
Anexo K. Cambio de cobertura a través del tiempo para Cultivos	75

## GLOSARIO

**ACTIVIDAD ANTRÓPICA:** acción y/o actividad realizada por el hombre sobre la faz de la tierra. (Construmática, 2021).

**BANDA ESPECTRAL:** se denomina banda a cada uno de los canales de adquisición de datos de un sistema sensor. Es la capacidad del satélite de recibir información del espectro. (Geomática, 2021).

**BALANCE HÍDRICO:** balance de agua basado en el principio de que durante un intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca de agua debe ser igual a la salida total de agua más la variación neta de almacenamiento de esta masa de agua. Volumen de agua que se desplaza de un depósito a otro a lo largo de un período determinado. (Ordoñez, 2011).

**CALIBRACIÓN:** proceso mediante el cual los datos obtenidos en el modelo hidrológico son ajustados a valores cercanos reales.

**CLASIFICACIÓN SUPERVISADA:** es la clasificación supervisada es el proceso mediante el cual, un ráster es clasificado por medio de los píxeles que componen la imagen. Se debe marcar el punto y asignar un valor numérico para cada clase. (Franzpc, 2012).

**CLASIFICACION NO SUPERVISADA:** es una clasificación en la cual no es una prioridad la obtención de las clases, sino que se realiza en base de probabilidades y se obtiene una imagen ráster reclasificada. (Franzpc, 2012).

**COBERTURA VEGETAL:** capa de vegetación que cubre la superficie terrestre con diferentes características fisionómicas y ambientales. Se deben incluir aquellas que han sido inducidas por acción humana. (Geoinstitutos, 2021).

**CUENCA:** unidad geográfica e hidrológica formada por un río principal y todos sus territorios asociados entre el origen del este y su desembocadura. La cuenca incluye los ecosistemas y todas sus interacciones. (International Union for conservation of nature, 2018).

**DEFORESTACIÓN:** disminución en la superficie cubierta de bosque a causa de factores antrópicos o naturales. (WWF, 2018).

**DEGRADACIÓN DEL SUELO:** proceso degenerativo que disminuye la capacidad del suelo para desarrollar sus principales funciones. (Euskadi.Eus, 2017).

**ECOSISTEMA DE ALTA MONTAÑA:** es aquel que está por encima de los 3500 y 4000 metros de altura sobre el nivel del mar. Aproximadamente el 11 % de la superficie de la tierra se localiza en zonas montañosas, donde se encuentran los nacimientos de los principales recursos hídricos del mundo. (Ministerio de Ambiente (Minambiente), 2018).

**EROSIÓN:** proceso degenerativo que reduce la capacidad de los suelos y les dificulta desempeñar sus funciones habituales. Se debe a causas naturales y antrópicas. (Euskadi.Eus, 2017).

**FRAILEJÓN:** planta netamente suramericana. Son claves en el proceso de captar agua en época de lluvias y liberarlas en tiempos de sequía, además, permite la circulación de agua que posteriormente va a ser liberada a ríos, quebradas y demás fuentes hídricas. Pertenece al grupo de las compuestas. (RAE, 2021).

**GEORREFERENCIACIÓN:** uso de coordenadas en un mapa para asignar una ubicación espacial a entidades cartográficas. Todos los elementos de una capa de mapa tienen una ubicación geográfica y una extensión específica que permite darle determinado lugar en la superficie de la tierra o cerca de ella. (ArcGIS Resource Center, 2014).

**GEOMORFOLOGÍA:** rama encargada del estudio de las características físicas de la superficie terrestre. (Raffino, 2020).

**HIDRÁULICA:** rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos. (Pérez y Gardey, 2018).

**IMAGEN SATELITAL:** representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen la información reflejada por la superficie de la tierra para que luego sea recopilada y procesada en la tierra. (Universidad de Ciencias y Humanidades UCH, 2018).

**IMAGEN LANDSAT:** son imágenes compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, con la función del monitoreo de la vegetación, geología y estudios de recursos naturales. (Alonso, 2015).

**MODELACION DE ELEVACIÓN DIGITAL:** representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos y objetos representantes en el mismo. (Santaella, 2016).

**MULTITEMPORAL:** que comprende múltiples periodos, estaciones o eventos.

**PIXEL:** es el punto más pequeño que compone una imagen satelital y básicamente determina cuán detallada es. Los datos Landsat tienen una resolución de 30m, lo que indica que cada pixel representa un área de 30 \* 30m. (Earth Observing System, 2020).

**PRECIPITACIÓN:** agua líquida o sólida formada en la atmósfera que regresa a la superficie terrestre en forma de lluvia, aguanieve, nieve, etc. (GeoEnciclopedia, 2021).

**RADIANCIA:** describe la cantidad de radiación electromagnética que es emitida por un área en particular en un ángulo sólido dado en una dirección específica. (Lira y Guevara, 2018).

**RADIOMETRÍA:** en la ingeniería y en la ciencia está relacionado con la medición de la radiación electromagnética, más específicamente con la medición de la energía de radiación electromagnética no coherente. (Ecured, 2021).

**SENSOR REMOTO:** es todo elemento o instrumento capaz de captar datos visuales, auditivos, electromagnéticos, entre otros. Su principio está basado en la noción del espectro electromagnético, ya que mide la energía que es reflejada por los elementos constituyentes de la superficie terrestre. (Ecured, 2021).

**TELEDETECCIÓN:** técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre a través de sensores instalados en las plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados para obtener información de la tierra. (Instituto Geográfico Nacional, 2021).

**USO DEL SUELO:** actividad que se presenta en determinada superficie terrestre, puede ser natural o relacionada con actividades humanas.

## RESUMEN

Los páramos son ecosistemas de montaña capaces de ofrecer gran variedad de funciones y servicios al hombre, dentro de las más importantes se resalta la regulación hídrica, gracias a las características de cobertura vegetal y altitud. El cambio climático y la intervención del hombre en cuanto a minería, agricultura y ganadería, han venido generando como consecuencia un alto grado de degradación ambiental. Disminuyendo así, sus principales funciones como la retención de agua y la infiltración. Este trabajo investigativo logró determinar la identificación de las zonas prioritarias de recuperación y las posibles medidas para tal fin. Lo anterior se pudo concretar mediante el procesamiento de imágenes satelitales, la delimitación de la subcuenca, la clasificación y caracterización de los suelos, en función a la variación del cambio de cobertura vegetal a través del tiempo y del uso de literatura para la recuperación de ecosistemas de alta montaña.

El análisis multitemporal de las imágenes satelitales confirmó que la intervención del hombre en los ecosistemas de alta montaña causa un grave deterioro de la cobertura vegetal y con ello la degradación de la vegetación nativa del lugar, dando lugar a fenómenos que alteran los servicios que los ecosistemas prestan al medio ambiente y al ser humano. Se pudo determinar que la cobertura vegetal que sufrió en grandes extensiones un deterioro considerable fue la vegetación de páramo, con una disminución del 14.8 %. El arbustal bajo disminuyó su extensión en 7.3 % y el bosque mixto se redujo en un 2.3 %. Se observó que donde disminuyeron las coberturas nativas ahora se encuentran vegetaciones relacionadas con los factores antrópicos, como lo son los cultivos. Dichas adaptaciones de los ecosistemas aumentaron en un 14 %. La ganadería es otro disturbio que está dejando consecuencias nefastas para la zona de estudio, debido al incremento de su cobertura en un 11.4 % y, como consecuencia de esta expansión, los suelos desnudos se han ampliado en un 0.8 %.

Palabras clave: páramo, cobertura vegetal, imágenes satelitales, plan de acción.

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto busca analizar los cambios en la cobertura vegetal que se han generado en la cuenca San José, a través del procesamiento de imágenes durante el período comprendido entre 1986 y 2020, por medio de la recolección de imágenes satelitales tipo Landsat con un porcentaje de nubosidad inferior al 10 %. Estas imágenes fueron utilizadas como un instrumento de análisis del deterioro de la cobertura vegetal, para a partir de la interpretación de los resultados poder diseñar e implementar un plan de acción que ayude a mitigar el impacto en las zonas en riesgo por diversos factores antrópicos y naturales.

La cuenca San José se encuentra ubicada en el Páramo Rabanal, el cual fue objeto de estudio por los investigadores, se encontraron daños en el suelo ocasionados por actividades antrópicas, como la minería, agricultura y ganadería. A partir de la identificación del origen de la problemática, se evaluaron las normativas vigentes en la preservación de este tipo de ecosistemas y los antecedentes en tratamientos de restauración por parte de otros investigadores en el tema, y a partir de ahí, se desarrolló el estudio sobre cambio del estado del suelo en el período de tiempo de estudio y se elaboró un plan de acción de restauración para recuperar las especies vegetales nativas y contribuir en la regeneración del suelo, para así, ayudar a que el páramo pueda realizar sus labores ecosistémicas de manera correcta.

Las imágenes satelitales descargadas fueron corregidas de maneras radiométricas, atmosféricas y geométricas, con la finalidad de conocer el deterioro de la cobertura vegetal de acuerdo a los distintos factores antrópicos que aquejan la zona, ya que los recursos originales contenían algunos errores. El cuerpo del trabajo se compone de las normas de protección ambiental a las zonas de páramo, los diferentes procesos realizados a las imágenes, los materiales y los métodos usados para el procesamiento de imágenes e información necesaria para determinar las zonas afectadas y poder establecer un plan de manejo ambiental adecuado en cuanto a las necesidades de la zona.

Esta investigación se llevó a cabo a partir de los métodos cuantitativos, descriptivos y explicativos, a través de 4 etapas principales: en la primera etapa se realizó la recolección y el procesamiento de información, con la finalidad de generar mapas que indiquen el nivel de cobertura vegetal, la geología del terreno y bases de datos climatológicos. La segunda etapa se refiere al proceso de modelación hidrológica. La tercera etapa consiste en la calibración de los distintos modelos generados. La última etapa del proyecto se centra al análisis del fenómeno y el planteamiento de una propuesta que contemple el control, la prevención y mitigación que llevaron a la degradación de la capa vegetal.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar el cambio de cobertura del suelo de la subcuenca San José, ubicada en el Páramo Rabanal, en el período de tiempo comprendido entre 1986 y 2020, mediante el uso y el análisis de imágenes satelitales y el procesamiento de la información recolectada.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular la variación multitemporal de la cobertura vegetal de la cuenca San José del páramo Rabanal.
- Formular un plan de recuperación en las zonas más afectadas en su cobertura vegetal, identificadas con base en el procesamiento y la interpretación de imágenes satelitales dentro de la cuenca San José.
- Calcular los índices de tasa de cambio y de vegetación remanente y, el Indicador de las tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra en el período de estudio.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El páramo es un ecosistema de alta montaña que funciona como regulador hídrico, reteniendo el agua en los periodos húmedos y liberándola en los secos, se caracteriza por ser frío y húmedo y, en ellos predomina la presencia de frailejones. (Corpoboyacá, 2016). Están ubicados en las montañas tropicales del centro y sur de América. Perú, Ecuador, Colombia, Venezuela y Costa Rica son los países de América que más poseen estos ecosistemas, con una altura entre 3000 y 4800 m.s.n.m. (Díaz-Granados et al., 2005). Según el instituto Alexander von Humboldt, en el mapa general de Ecosistemas de Colombia (1998) se menciona un total de 1'379.000 Ha. de páramos en el territorio nacional, correspondientes al 1.3 % de la extensión territorial del país. Este tipo de ecosistema está principalmente compuesto por páramos húmedos, los cuales comprenden el 89 % del total de páramos colombianos. (Minambiente, 2002).

Los páramos se ven afectados por diversos factores como la agricultura, la agronomía, la minería, el calentamiento global, entre otras, los cuales desembocan en la destrucción de la vegetación del páramo. Las actividades de la agricultura, generan variaciones en la composición y la estructura del páramo, conllevando pérdidas de su cobertura vegetal hasta en un 10 % del total de su área y de especies en el mismo. Del mismo modo, la introducción de especies intrusivas como el pino, logra afectar los niveles de retención y almacenamiento de agua en los páramos (Quintero, 2016).

Para el caso del páramo de Rabanal, ubicado en el municipio de Ventaquemada, debido al tipo de formación geológica de este territorio, la minería es de roca blanda, lo cual quiere decir que no exige el empleo de explosivos durante el proceso de extracción. Por lo que las condiciones geológicas del área han posibilitado la expansión de la actividad minera a lo largo del páramo, debido a que dentro de la formación Guaduas se encuentran niveles de carbón con espesores que van desde los 0.6 m hasta 1 m. Esta actividad ha significado una oportunidad de riqueza y empleo, pero a la vez ha generado un grave impacto ambiental en el agua, el suelo, el aire y el paisaje de la región. La dinámica hídrica a nivel superficial y subterráneo es uno de los aspectos más complejos a tratar en la zona. (CORPOCHIVOR, 2018).

Según datos estadísticos, en Colombia son 22 los ecosistemas de páramo amenazados a causa de un total de 391 títulos mineros otorgados, que han afectado 108.972 Ha. En el páramo El Rabanal y el río Bogotá, se otorgaron 17 títulos que afectan a 8.395 Ha; en las que se encuentran aproximadamente 11 comunidades. (El Espectador, 2011).

En Ventaquemada se desarrollan actividades mineras afines al carbón, en un área total de 42.69 Ha. La actividad de carbón coquizable cuenta con un área de 30.62 Ha, pero el problema ambiental ha incrementado debido a empresas multinacionales y a la minería

ilegal. Gran parte de las licencias otorgadas en esta zona, caducan aproximadamente dentro de diez años. (CORPOCHIVOR, 2018).

La ganadería es el segundo sector más importante en la economía de las familias habitantes del páramo de Rabanal. Ventaquemada produce aproximadamente 12.500.000 litros anuales de leche y es comercializada en Bogotá y en el área local, para producción de lácteos y productos típicos como las arepas. La ganadería presente en el páramo es a baja escala y en la zona predomina la raza de ganado normanda, seguida por el pardo suizo. La razón de producción de leche por hectárea es de 60 litros por día.

La papa es un factor importante en la economía del municipio de Ventaquemada, cuenta con una producción de 100.840 toneladas anuales y es el quinto municipio productor de papa a nivel nacional. La zanahoria es un producto neto del páramo con una producción anual de 13.000 toneladas.

Las anteriores actividades económicas han afectado de manera significativa el ecosistema del páramo y para finalizar, el otro factor importante a considerar es el cambio climático. Según un estudio del IDEAM realizado en 2015 sobre factores climáticos, se encontró que las lluvias podrían incrementar entre un 11 % y un 20 % entre 2011 y 2040. Este fenómeno suministraría materia prima al páramo para el procesamiento de recolección hídrica. La temperatura tenderá a aumentar en un 0.5 % entre el mismo período. Estos hallazgos dan a entender que es un ecosistema que no sufre de cambios drásticos de temperatura. (CORPOCHIVOR, 2018).

Estos son los principales factores que influyen directamente en la degradación del suelo. Es necesario que, para la restauración de las zonas afectadas por estas actividades, se emplee una acción en el cambio del suelo que ayude a su recuperación, teniendo en cuenta las principales características del lugar y el agente que lo afectó. Por lo que, hay que considerar que los suelos de los ecosistemas paramunos tienen una alta tasa de infiltración, debido a que sus suelos son altamente porosos, permitiendo la conductividad hidráulica y la retención de agua es demasiado importante y significativa, ya que en los primeros 30 cm de profundidad el agua ocupa el 61.7 % del volumen total del suelo. (Díaz et al., 2005)

Al cambiar el uso del suelo de los ecosistemas paramunos, se afectaron las propiedades físicas del suelo. Los cultivos de papa afectaron la capacidad de almacenamiento de agua en las zonas en que se encuentran ubicados, pudiendo disminuir la capacidad de almacenamiento de humedad en un 60 % y la porosidad hasta en un 23 %. (Daza, Hernández y Triana, 2014).

En resumen, el Páramo Tibaná es un ecosistema afectado por acciones antrópicas desde hace varios años y como consecuencia su suelo ha sufrido alteraciones que lo han llevado a perder parte de sus capacidades de almacenamiento de agua y porosidad. Dicha situación, al no ser intervenida de manera científica y técnica conlleva a un

incremento en la pérdida del ecosistema y de las especies que lo habitan, por lo que la necesidad de una intervención profesional en el contexto del territorio es esencial.

## 2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Se han generado cambios en la cobertura vegetal en la zona de la cuenca San José, a raíz de la presencia de actividades antrópicas, en el período entre 1986 y 2020?

### 3. JUSTIFICACIÓN

Factores como la intensificación de la agricultura, la ganadería, la explotación minera, la tala indiscriminada, el aprovechamiento descontrolado de la flora y fauna, la erosión por escorrentía, la disminución en la retención hídrica de los páramos, la extinción de especies endémicas, la contaminación de residuos sólidos y líquidos por abonos y herbicidas, el deterioro del suelo, la pérdida de biodiversidad y los acelerados efectos del calentamiento global, aumentan de forma acelerada la degradación del páramo, haciendo difícil evidenciar cuales son los efectos de cada uno de los agentes degradadores (Garavito, 2015). Todos estos efectos, han sido causados por acciones antrópicas que impactan de manera grave a ecosistemas, por lo que surge la preocupación y urgente búsqueda de estrategias que contribuyan a la mitigación de efectos contaminantes en la actualidad, ya que en el pasado el ser humano se ha encargado de dominar la naturaleza y hacerla una herramienta para el desarrollo de sus inventos sin considerar el impacto que ha tenido.

Un caso en concreto, que es el objeto de estudio en esta investigación es el deterioro de suelo y especies vegetales en el páramo El Rabanal, por actividades antrópicas. Según el plan participativo de manejo y conservación del macizo del páramo de Rabanal, las principales actividades que amenazan a este complejo son: la agricultura comercial de papa con técnicas de labranza que aumentan la erosión del suelo, la creación de potreros para ganadería de leche con el manejo inadecuado de pasturas introducidas o nativas y el continuo sobrepastoreo; las plantaciones forestales industriales con especies exóticas que reemplazan la diversidad de funciones de la vegetación nativa; actividades de exploración y explotación minera de carbón, oro y otros minerales; incendios y usos inadecuados del fuego; cacería y extracción de madera, leña y otros recursos vegetales; la inadecuada planificación y construcción de obras de infraestructura como carreteras y embalses; creciente demanda y conflictos por el uso del agua para fines de riego, industriales y de consumo; y finalmente, los cambios directos e indirectos causados por el cambio climático. (Tapia, 2009).

Las consecuencias que más se ven reflejadas en los servicios ecosistémicos de un páramo son: la compactación del suelo afectando a la retención del agua, el incremento de la densidad aparente y la disminución de la retención de humedad. De igual forma, se ven afectados los niveles de nitrógeno y fósforo, por prácticas agrícolas y pecuarias: desde la preparación del terreno se elimina toda la vegetación y se cambia su uso, causando así, una total sequía y la liberación de los nutrientes. Luego del primer año de cultivo, se usan todas las reservas de fósforo sin ningún tipo de protección para los suelos contra la erosión hídrica y eólica, el uso de fertilizantes, pesticidas, especies vegetales, mal manejo de residuos y la mala compensación por pérdidas de nutrientes con fertilizantes (Sarmiento et al., 2013).

Este trabajo de carácter investigativo, pretende determinar el grado de afectación en la cobertura vegetal del complejo del páramo El Rabanal, para poder idear un plan de acción

que influya en el mejoramiento y rehabilitación del ecosistema y sus funciones. Para llevar a cabo este proyecto se va a simular en diversos lugares afectados con distintas coberturas vegetales y así, encontrar las más adecuadas para las características del suelo y el ecosistema. Además, se establecerán convenios con entidades encargadas de la conservación de este territorio natural. Este proyecto presenta el gran reto de adaptarse y lograr una aceptación colectiva, ya que la búsqueda de la preservación del suelo podría generar un conflicto de intereses con la comunidad, teniendo en cuenta que las actividades de producción de los habitantes del páramo son las que están causando la degradación ecosistémica actual en la zona.

Teniendo en cuenta los factores que actualmente están afectando al ecosistema del páramo y la relevancia ecológica, social y humana que posee la preservación de lugares naturales, es de suma importancia crear un plan de acción a partir de la investigación sobre el estado actual del suelo del lugar, que se encargue de promover la regeneración de las capas de suelo dañadas, de informar a la comunidad sobre la importancia del cuidado ambiental de los páramos y el impacto negativo que están causando actividades económicas ejercidas en la zona.

Desde la formación profesional de los investigadores, como ingenieros civiles, es de interés y relevancia atender a problemáticas rurales y ambientales desde la disciplina, ya que para contribuir al bienestar de la humanidad, hay que considerar la sostenibilidad y preservación de la naturaleza en la creación de espacios y de actividades laborales a través de conocimientos científicos, el uso de recursos tecnológicos, como las imágenes satelitales, el análisis crítico sobre factores sociales y económicos. A la vez, se deben hacer más aportes en el campo investigativo de la disciplina en propuestas ambientales que se enfoquen en territorios rurales, con el fin de preservar sus recursos y fomentar estrategias de acciones antrópicas de la población y las industrias que se basen en el cuidado ambiental, ya que en los últimos años se ha hecho evidente la urgencia y relevancia que debe tener el cuidado de la naturaleza y la adaptación de actividades económicas para que generen el menor impacto contaminante posible.

Además de ser pertinente esta investigación para el desarrollo sostenible, también es un trabajo en el cual se evidencia que los investigadores cumplen con la adquisición de habilidades propias de la disciplina profesional que ejercen. Según la Universidad Santo Tomás deben ser capaces “de comprender y desarrollar soluciones creativas a las necesidades de la comunidad en las áreas de estructuras, aguas, suelos y geotecnia, vías y transporte y administración de recursos, dentro de un contexto sostenible.” (2019). Lo cual, se evidencia en el desarrollo de este trabajo al comprender necesidades del ambiente y desarrollar estrategias de restauración de suelos, con el fin de preservar los recursos naturales.

#### 4. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, los estudios del cambio de cobertura en los diversos ecosistemas a nivel mundial han tomado mayor relevancia, debido a factores como el cambio climático y actividades que el ser humano desarrolla en estos importantes lugares del planeta. Se ha vuelto una necesidad de primera mano, el estudio de estos cambios en la cobertura del suelo y encontrar la manera de revertir las graves consecuencias que han dejado estos factores en los últimos años. La preocupación por las consecuencias que traerá en un futuro este tipo de actividades que no son reguladas ha aumentado significativamente, por lo que se deben tomar medidas preventivas, para que en unos años no existan daños irremediables.

*Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña (2015)* es una investigación sobre cómo la zona de transición mexicana de montaña y la vegetación se ha visto modificada por la influencia de procesos antropogénicos. El objetivo general de esta investigación conduce a analizar los cambios de cobertura y uso del suelo ocurridos entre 1989 y 2009, usando mapas de uso de suelo y vegetación, producto de la interpretación de imágenes satelitales y la aplicación del algoritmo máxima verosimilitud, para conocer y entender la dinámica y los procesos de cambio de coberturas y el uso del suelo que caracteriza esa región. A partir de la sobreposición de los mapas, se elaboró una matriz de cambios que comprende la superficie de las coberturas y usos del suelo para cada año y con base en esto, se determinaron las tasas de cambio. En este estudio, se muestra que la cobertura de bosque disminuyó considerablemente, perdiendo aproximadamente 19.262 Ha, divididos principalmente en cuerpos de agua (105 ha), agropecuario (19.133 ha), asentamientos humanos (39 ha) y la agricultura controlada (5 ha), siendo la agricultura y la ganadería, dos factores de vital importancia en la deforestación del suelo. (Camacho et al., 2015).

En Progreso, Hidalgo, México, la pérdida de la rentabilidad y la capacidad productiva agrícola está ocasionando cambios en las coberturas de uso de suelo y vegetación. El objetivo fue analizar los cambios de cobertura y uso de suelo para los años comprendidos entre 2000 – 2007 y 2007 – 2015, mediante mapas y su debido procesamiento de interpretación visual. Los mapas fueron sometidos a su respectiva validación cartográfica para conocer la confiabilidad del material. Gracias a la sobreposición de dichos mapas se lograron conocer los indicadores de cambio, índices de Mraimoh y tasas de cambio. Los resultados muestran que entre los años 2000 y 2007, la agricultura y bosque decrecieron cerca de 23 y 17 ha respectivamente. La cobertura que obtuvo mayores ganancias fue la de los invernaderos, con 5.2 ha, mientras que entre 2007 y 2015 la agricultura perdió cerca de 19 ha y los invernaderos cerca de 15 ha. La superficie agrícola se vio afectada principalmente por la implementación y expansión de nuevos espacios ocupados por producción agrícola en invernaderos igualmente condicionados por factores ambientales. (Camacho et al., 2017).

En el Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica, se analizó la subcuenca del río Reventado. *“MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA CUANTIFICAR LA PRODUCCIÓN DE AGUA Y SEDIMENTO ACTUAL Y FUTURO A PARTIR DE CAMBIOS DE COBERTURA FORESTAL, SECTOR PRUSIA, PARQUE NACIONAL VOLCÁN IRAZÚ”* (2018), es una investigación que se planteó el objetivo de evaluar los cambios en la producción de agua y sedimento bajo distintos escenarios de cambio de cobertura. El modelo hidrológico se usó para evaluar el comportamiento de la producción de agua y sedimento. Para este cambio de cobertura forestal se consideraron dos escenarios: eliminar las plantaciones forestales y dejar el suelo descubierto y; acabar con las plantaciones y dejar que la vegetación se regenere naturalmente. En el primer escenario el agua sufrió un aumento cercano al 1.3 % y un descenso del 0.69 % para el segundo escenario. La sedimentación aumentó en el primer caso 2.8 % y disminuyó para el segundo escenario 1.95 %. Al cambiar la cobertura forestal de lugar, la dinámica hídrica se modifica generando una afectación de agua, caudal y sedimento. (Valverde, 2018).

En el caso del páramo Cruz Verde, Sumapaz, la investigación *LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA COMO ESTRATEGIA PARA LA SUSTITUCIÓN Y RECONVERSIÓN PRODUCTIVA EN LA DELIMITACIÓN DEL PÁRAMO CRUZ VERDE – SUMAPAZ* (2018), sugiere la aplicación de una restauración ecológica debido a que las comunidades campesinas del sector han evidenciado que algunas actividades antrópicas como la ganadería, la agricultura, la minería y/o refinamiento están poniendo en jaque al ecosistema de este importante páramo. Este estudio sugiere un plan de restauración como opción de reconversión productiva. El proyecto se basa en los planes que ya han sido implementados en otros ecosistemas del mismo tipo. En primera instancia, se lograron identificar los tensionantes que se presentan en la zona, los cuales, según la bibliografía consultada, hacen parte del primer paso para comenzar una restauración ecológica. Además, se identificaron las zonas que deben ser intervenidas inmediatamente. Los resultados arrojados en la investigación permiten concluir que, la articulación de estrategias, implementación y monitoreo suponen costos muy altos, pues están proyectadas a mediano y largo plazo, debido a que la delimitación de este páramo coincide con muchas fincas y lugares previamente ocupados por campesinos a los cuales es imposible instruir en nuevas actividades económicas. (Ariza, 2018).

*EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA COBERTURA Y USO DE LA TIERRA CON IMÁGENES DE SATÉLITE EN PIURA – PERÚ* (2011), fue un estudio en el que se realizó el estudio del bosque seco localizado en la región de Piura, Perú con el objetivo de evaluar el cambio de la cobertura y el uso de la tierra. Se utilizó el procesamiento digital de imágenes satelitales registradas entre 1999 y 2001, a través de una clasificación supervisada, usando el algoritmo de máxima verosimilitud. Los resultados se compararon con el mapa de bosques secos elaborados por INRENA, con interpretación visual de imágenes registradas entre 1986 y 1994. Las imágenes tuvieron un acierto del 89 % y al comparar estas, se logró evaluar la dinámica espacio-temporal de los bosques secos, cuantificando los retrocesos y las mejoras de los mismos. El 38 % del área de bosque seco permaneció sin variación, mientras que un 13 % mejoró su condición y el otro 23 % tiende a la reducción de cobertura. Además, se concluyó que el procesamiento digital de

imágenes satelitales permite agilizar el proceso y ser más precisos que la interpretación visual. (Zorogastúa, Quiroz y Garatuza, 2011).

*Análisis multitemporal de la cobertura de páramo en la producción de agua en la cuenca alta del río Apuela, Cantón Cotacachi, provincia de Imbabura* (2016) es un trabajo de tesis en el que se encuentra que la provincia de Imbabura, Ecuador, es caracterizada por poseer una economía basada en actividades agrícolas y pecuarias. Se realizó un estudio para determinar los cambios sufridos en la cobertura vegetal debido a actividades antrópicas asociadas a la economía de la región y se analizaron de manera multitemporal entre los años 1991 y 2015 con la ayuda de imágenes satelitales. La investigación tenía el propósito de facilitar la implementación de propuestas que ayuden y mejoren la conservación de los recursos bióticos y abióticos en la microcuenca del río Yanayacu durante el periodo de 1991 y 2008. En el lugar de estudio existieron disminuciones de bosque, tierras agropecuarias y otras tierras en un 19.85 % y un aumento del caudal de 1.4 m<sup>3</sup>/s y 0.3 m<sup>3</sup>/s en épocas de lluvia y sequía, respectivamente. En los periodos de 2008 y 2015 disminuyó la vegetación arbustiva un 23.15 % y aumentó el caudal en 7.7 m<sup>3</sup>/s en épocas húmedas, mientras disminuyó en 0.5 m<sup>3</sup>/s en periodos de sequías. Estos resultados indicaron incidencia directa a corto plazo en el aumento del caudal máximo en el punto de salida de la cuenca. (Andrade, 2016).

*Cambios de la cobertura de los suelos para la elaboración de escenarios territoriales en la región Apurímac* es un estudio sobre la subcuenca del río Vilcabamba, Perú, a través del análisis de imágenes satelitales de los años 1986, 1994, 2002 y 2009, se elaboraron matrices de cambio de cobertura, aplicando el modelo de Markov, para proyectar tendencias de cambio en la zona baja, media y parte alta para el 2016. Los resultados muestran el incremento de las áreas agrícolas en la parte baja y media de la subcuenca, como principal factor en la causa del desgaste de cobertura vegetal y, en la parte alta se encontró una reducción drástica de los nevados. La degradación de la cobertura vegetal, la reducción de las fuentes de agua, la actividad minera y los eventos climáticos son las causas principales de la afectación que sufre la cobertura vegetal. Los escenarios territoriales para el 2016 exponen que las tendencias en el período 2002 - 2009 se mantendrán. Por otro lado, los resultados sugieren que la actividad que mayor influencia tendrá sobre el territorio y su falta de preservación será la minería. (Ibañez y Damman, 2013).

En la microcuenca del río Itambi, ubicado en Ecuador, ha surgido en los últimos años, un aumento en la densidad poblacional y con ello, un aumento en actividades de agricultura y ganadería. Esto ha ocasionado un cambio en el uso del suelo y pérdida de servicios ecosistémicos. *Efectos del cambio del suelo sobre el servicio ecosistémico hídrico de provisión en la microcuenca del río Itambi*, es un trabajo investigativo que surgió con la finalidad de determinar los efectos del cambio de uso de suelo en el servicio ecosistémico en la microcuenca, en el período 2000 – 2014, mediante herramientas como SIG, la variación en la producción de caudales y la aplicación de regresiones lineales y regresiones geográficamente ponderadas, que se aplicaron para conocer la relación entre cambios de uso de suelo y variación de caudales. Durante este período aumentó la

zona urbana, pastos e infraestructura agrícola con el 0.0 %, 0.06 % y 0.12 %. Las coberturas de bosque, vegetación arbustiva y páramo disminuyeron en un 2.2 %, 2.59 % y 0.19 %. La cobertura de cultivos predominó con un 50.13 % y 49.91 %. Teniendo en cuenta que estas actividades requieren mayor demanda de recurso hídrico, en este mismo período se pudo observar que la oferta del servicio ecosistémico hídrico disminuyó 0.09% m<sup>3</sup>/s. La relación entre el cambio de cobertura vegetal y el cambio de caudales se debe a la dominancia de los cultivos en la zona, la reducción de áreas naturales y el aumento en las zonas urbanas en algunas zonas críticas de la microcuenca. (Ruales y Dávila, 2019).

Los bosques de la Amazonía peruana han experimentado importantes transformaciones desde mediados del siglo pasado. El estudio *Deforestación en la Amazonía peruana: índices de cambios de cobertura y uso del suelo basado en SIG* evaluó los cambios de cobertura y uso del suelo en la provincia de Rodríguez de Mendoza, mediante los métodos de clasificación supervisada de máxima probabilidad e interpretación visual interdependiente de imágenes satelitales tipo Landsat, entre los períodos de 1987 - 2001 y 2001 - 2016. Se construyeron matrices de tabulación cruzada y se calcularon tasas e índices anuales de cambio. Los resultados muestran una pérdida acumulada de 918.59 km<sup>2</sup> de cobertura boscosa y la intensidad de cambio de cobertura y uso del suelo y la tasa de deforestación fueron mayores en el segundo período de análisis. Se evidenció que las altas concentraciones de pérdida de cobertura boscosa se encuentran próximas a la red vial hídrica. Las principales causas de pérdida de bosques fueron la actividad ganadera y la expansión agrícola migratoria o pequeña explotación, favorecidas por la accesibilidad de infraestructuras de transporte. (Rojas, et al., 2019).

El páramo Rabanal es un macizo montañoso que comprende los departamentos de Boyacá y Cundinamarca sobre la cordillera Oriental. Dicha zona del centro oriente de Colombia, se ha visto afectada a lo largo del tiempo por la intervención del hombre, transformando el paisaje y causando serios problemas en su ecosistema, afectando directamente los servicios que se encarga de proporcionar al planeta. Cerca de 300.000 habitantes se ven beneficiados directamente de este complejo paramuno. Graves consecuencias ha dejado la incursión del ser humano en este territorio, desde el deterioro de la cobertura vegetal nativa hasta serias afectaciones en las aguas superficiales y subterráneas. Para contrarrestar los efectos de estas actividades antrópicas, se creó una estrategia con el fin de manejar el paisaje y la restauración ecológica, para recuperar el ecosistema; entre las estrategias más importantes se encuentra un sistema agropecuario sostenible, que permite principalmente la reducción de la contaminación del agua, el deterioro y cambios en la cobertura vegetal dando prioridad a los lugares con mayor altura donde se encuentren cultivos de papa y en donde se apliquen productos químicos nocivos para el suelo y subsuelo. La minería también es un tema importante en cuanto al cumplimiento de normas y estándares ambientales establecidos por la normativa colombiana. (Tapia, 2009).

Se realizó un estudio de cambio de cobertura de uso de suelo en el municipio de Popayán a través de un análisis multitemporal en la zona de influencia del programa Silvicultura,

como alternativa de producción en la zona marginal de la cuenca del río Magdalena, la cual comprende los municipios de Popayán, Timbio, Támbio y Sotará, dentro de los cuales se realizaron siembras como parte de las actividades del programa. Se cuantificó el área de cobertura boscosa con base en los datos del período comprendido entre 2003 y 2016. Estas zonas tuvieron un aumento del 3 %, observándose principalmente sobre los bordes de los ríos y quebradas. Los pastos disminuyeron en un 3 % y dicho cambio fue atribuido al incremento del área de bosques, lo cual le quita terreno y cambia el uso del suelo en esta zona. Las áreas deforestadas se encuentran sobre áreas boscosas en zonas de amortiguamiento de la cuenca del río y en las zonas intermedias. (De la Cruz y Muñoz, 2016).

Por medio de un análisis en el tiempo, se observaron los cambios presentados en la cobertura vegetal entre los años 2000 y 2012 en la cuenca de Sardinata, Norte de Santander, se estableció la finalidad de determinar la influencia del cambio de cobertura vegetal en la generación de caudales pico de la cuenca Sardinata, realizando el análisis multitemporal de la variación de coberturas con el uso de SIG. Al ser una zona con altos índices de deforestación en los últimos años, se ejecutó el procesamiento y modelación de los datos hidrológicos obtenidos en este periodo de tiempo para estimar la influencia que ha tenido la variación de las coberturas en la generación de caudales pico de la misma. Sin embargo, en la cuenca del río Sardinata los cambios de cobertura durante el período analizado no se consideran críticos, dado que no son suficientes para generar caudales picos extremos en la cuenca. Se evidencia que entre los años 2000 y 2012 aparecen tres coberturas adicionales: a) Bosque de galería, B) Plantación forestal y, C) Bosque abierto. La cobertura que más cambios tuvo en cuanto a distribución espacial fue la de “Pastos limpios”, aumentando de 5.36 % a 19.8 %. El mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales disminuyó su área en un 7.16 % y, por último, la cobertura de “Bosque denso” se redujo en un 4.66 %.

Los investigadores recomiendan realizar una revisión y actualización de la información oficial por parte de las entidades respectivas, con el fin de contar con datos precisos y relacionados con la realidad de la zona. (Hernández y Salamanca, 2019).

En primer lugar, es necesario escoger el método de clasificación de la cobertura vegetal según las condiciones y/o características de la zona en la cual se va a realizar el estudio para la obtención de datos más precisos. La metodología con la cual se va a desarrollar este proyecto, permite desarrollar un mapa en el cual se clasifica la cobertura por la teledetección utilizando imágenes Landsat, las cuales son calibradas y se clasifican según el tipo de cobertura del lugar, en algunos lugares se recomienda hacer una inspección visual en el caso de que se dude de las imágenes satelitales. Es recomendable analizar algunos lugares del planeta, para conocer el sistema de trabajo del software y para conocer un poco mejor el funcionamiento y posibles resultados que arroje el programa. (Quintero, 2016).

El páramo de Berlín, ubicado en los departamentos de Santander y Norte de Santander, posee increíbles riquezas naturales de orden vegetal, animal y paisajista. Es un

ecosistema clave, no solamente para estos dos departamentos, sino para la zona oriental de Colombia, debido a que se trata de una zona de intercambio y tránsito de recursos bióticos, de fauna y flora. Como en la mayoría de estos ecosistemas, el principal problema radica en factores antrópicos. El plan de manejo integral de este importante ecosistema está basado principalmente sobre los recursos del suelo, agua, flora, fauna y aire, para ello se busca que los disturbios se realicen de una forma sostenible y, de manera paralela realizar una zonificación ambiental con el fin de dar aprovechamiento y generar las condiciones adecuadas de la siguiente manera; zonas de recuperación para la producción (8344 ha), zonas de protección (434 ha) , zonas para la preservación (33013 ha) y zonas de recuperación para la preservación (2423 ha). (Restrepo, Suárez y Álvarez, 2008).

En el páramo de Pisba, Boyacá, a través del análisis y modelamiento hídrico de las subcuencas pertenecientes al mismo, se determinó la capacidad de regulación hídrica del páramo y estimó cual ha sido la reducción y alteración de la cobertura vegetal en cuanto a la captación y mantenimiento del recurso hídrico durante el periodo 1985 – 2015, haciendo uso de las imágenes satelitales con un porcentaje de nubosidad inferior al 5 %, se logró determinar que durante el período en mención se ha perdido cerca de un 0.53 % de territorio de páramo, dando paso a terrenos de ganadería y vegetación de bajo tamaño. Se estimó una pérdida de extensión del nevado del Cocuy de aproximadamente 3.68 %, asociada al aumento de las temperaturas por el fenómeno del calentamiento global. Se pudo establecer una relación directa entre la pérdida de cobertura vegetal perteneciente a páramos y la acentuación de los picos en períodos húmedos/secos, demostrando así, que la reducción de zonas de páramos afecta la recarga hídrica y reduce la descarga del recurso hídrico captado por los frailejones. (Quintero, 2016).

La tendencia a nivel global para determinar qué tan afectada se encuentra la cobertura vegetal y el uso del suelo en estos importantes ecosistemas es el procesamiento de imágenes satelitales tipo Landsat. Este proceso permite calcular el porcentaje de pérdida de cobertura vegetal según el tipo de actividad que se realice en el lugar, bien sea ganadería, agricultura, minería o simplemente consecuencias del calentamiento global.

En otros estudios, se elaboraron matrices de cambio de cobertura, aplicando el modelo de Markov, se proyectaron tendencias de cambio en la zona baja, media y parte alta para un determinado período de tiempo. Sobre este instrumento subrayan dos importantes recomendaciones algunos autores: a) La calidad de las imágenes satelitales no son tan buenas, en algunas, el porcentaje de nubosidad es muy alto y no se logran ver algunos detalles, b) Los datos climatológicos son incompletos en algunos períodos de tiempo, para ello, es necesario completar algunos datos faltantes, proceso que conlleva más tiempo en la ejecución. Gracias a este procesamiento de datos, se ha podido establecer mediante diversos estudios que los factores como la ganadería, agricultura, minería y cambio de usos de la tierra son las razones por las cuales la cobertura vegetal en ecosistemas de páramo se ha visto reducida y notablemente afectada. La intervención del hombre en estos ecosistemas trae graves consecuencias, afectando a un incontable

número de personas, ya que conlleva a la escases y empeoramiento en la calidad de agua.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1 PÁRAMO

Es un ecosistema de alta montaña que funciona como regulador hídrico, reteniendo el agua en periodos húmedos y liberándola en periodos secos. Dadas sus condiciones de temperaturas muy bajas, presenta características fría y húmeda (inferiores a 3°C), en las cuales es normal la presencia del frailejón. (Corpoboyacá, 2016).

Desde hace aproximadamente cinco millones de años, cuando terminó el levantamiento final de la cordillera de los Andes, se inició el proceso para la creación de los bosques andinos y en la parte superior de estos, los páramos con una altura superior a los 3.000 metros sobre el nivel del mar (msnm). Sus diversas características de clima, flora, fauna y de suelos hace que esté presente en países como Perú, Ecuador, Colombia, Venezuela, Panamá y Costa Rica. (Morales et al., 2007).

En Colombia, los páramos son ecosistemas prioritarios para el gobierno, ya que son considerados como ecosistemas estratégicos por su importante protagonismo en la regulación del ciclo hidrológico. Sustenta el suministro del preciado líquido, tanto para el consumo humano, como para la realización de algunas actividades económicas que involucran al 70 % de la población del país. En 1993, el tema de la conservación de páramos empezó a tomar gran importancia constitucional a través de la Ley 99 del año en mención. (Minambiente, 2018).

Este ecosistema se caracteriza por el predominio de vegetación abierta, climatológicamente el páramo presenta lluvias la mayor parte del año y sus temperaturas no superan los 10°C entre el día y la noche cuando está por encima de los 3800 metros de altitud. Los páramos en Colombia se asimilan a zonas de áreas altas, húmedas, nubladas y frías. (Morales et al., 2007).

El suelo más común en los páramos es de origen volcánico, tiene un color negro y un alto contenido de materia orgánica. Debido a las bajas temperaturas, el material se conserva sin presentar descomposición por el gran contenido de aluminio en la ceniza volcánica y la materia orgánica que forman una combinación adecuada y resistente a la descomposición. El proceso de regulación hídrica consiste básicamente en retener agua por largos períodos de tiempo y en liberarla de una forma paulatina, lo cual justifica el porqué estos ecosistemas no se deben considerar productores de lluvia sino reguladores. (Hofstede, Segarra y Mena, 2003).

Los páramos ofrecen gran cantidad de servicios ambientales, la fijación de carbono atmosférico, sumidero de residuos, corredores biológicos, protección de la biodiversidad y la regulación hídrica. (Corpoboyacá, 2016). La última es aquella capaz de retener agua en periodos húmedos y liberarla en periodos secos, esto gracias a las diversas

características que tienen los suelos de los páramos para llevar a cabo la tarea responsable de abastecer del preciado líquido a más del 70 % de la población colombiana. Además de esto, cabe destacar que en estos lugares nacen los ríos más importantes del país.

#### 5.1.1 Normativa

- Según la resolución 0769 del 05 de agosto del 2002, el páramo es un ecosistema de alta montaña, ubicado entre el límite superior del bosque andino y, si se da el caso, con el límite inferior de los glaciares o nieves perpetuas, en el cual domina una vegetación herbácea y de pajonales, frecuentemente frailejones y puede haber formaciones de bosques bajos y arbustivos y presentar humedales como los ríos, quebradas, arroyos, turberas, pantanos, lagos y lagunas. Se divide en tres franjas de forma ascendente: el subpáramo, el páramo y el superpáramo. Los límites altitudinales en que se ubican estos ecosistemas varían entre las cordilleras, debido a factores orográficos y climáticos locales. (Minambiente, 2002).
- Ley 99 de 1993: establece los principios generales ambientales. Reglamenta en el artículo I que los páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial. (Minambiente, 1993).
- Resolución 0769 del 5 de agosto de 2002: dicta las disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos. Considera que estos ecosistemas son de singular riqueza cultural y biótica, y con un alto grado de especies de flora y fauna endémicas de gran valor, que constituyen un factor indispensable para el equilibrio ecosistémico, el manejo de la biodiversidad y del patrimonio natural del país. Establece las medidas de protección, conservación, manejo sostenible y restauración de los páramos. (Minambiente, 2002).
- Resolución 0839 del 01 de agosto de 2003: establece los términos de referencia para el desarrollo de estudios sobre el Estado Actual de Paramos (EAP) y la formulación de Planes de Manejo Ambiental (PMA), considerando estos dos procesos como complementarios y continuos. (Minambiente, 2003).
- Ley 1382 de febrero del 2010: establece zonas excluibles de la minería. No se permite la ejecución de trabajos y obras de exploración y explotación minera en zonas declaradas delimitadas conforme a la ley como de protección y desarrollo de los recursos renovables o ambientes. Estas zonas serán las que han sido declaradas como sistemas de parques nacionales naturales, parques naturales de carácter regional, zonas de reserva forestal protectora y demás zonas de reserva forestal. Ecosistemas de páramo y los humedales designados dentro de la lista de importancia internacional de la convención de Ramsar. (República de Colombia, 2010).

- Decreto 2372 de 01 de julio de 2010: reglamenta el sistema nacional de áreas protegidas, las categorías de manejo que los conforman y los procedimientos generales relacionados con dicha actividad. El gobierno debe asegurar los procesos ecológicos y evolutivos naturales para mantener la diversidad biológica, garantizar la oferta de bienes y servicios ambientales esenciales para el bienestar humano, así como la permanencia del medio natural para mantener la diversidad cultural del país y la valoración social de la naturaleza. (Minambiente, 2010).
- Ley 1450 de 2011: establece que los páramos y humedales deberán ser delimitados a escala 1:25.000 en base a criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales establecidos por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible. Los grandes centros urbanos y los establecimientos públicos ambientales realizarán el proceso de zonificación, ordenamiento y determinación del régimen de uso de páramos con base a dicha delimitación. Recalca que en estos ecosistemas no se podrán adelantar actividades agropecuarias, ni de exploración o explotación de hidrocarburos y minerales, ni de construcción de refinerías de hidrocarburos. Considera como mínima referencia la cartografía en Atlas de Páramos de Colombia, del Instituto de Investigación Alexander von Humboldt, hasta contar con una cartografía a escala más detallada. (Congreso de la República de Colombia, 2011).
- Ley 1930 del 27 de julio de 2018: el objeto de esta ley es establecer como ecosistemas estratégicos los páramos y fijar directrices que propendan por su integridad, preservación, restauración, uso sostenible y generación de conocimiento. Ya que gracias a estos ecosistemas se obtiene la provisión del recurso hídrico, se consideran de prioridad nacional e importancia estratégica para la conservación de la biodiversidad del país, ordena que el uso del suelo debe estar enmarcado en la sostenibilidad e integralidad de los páramos. Se debe garantizar el diseño e implementación de programas de restauración ecológica, soportados en el Plan Nacional de Restauración en aquellas áreas alteradas por actividades humanas o naturales, se debe adoptar un enfoque ecosistémico intercultural que reconoce el conjunto de relaciones socioculturales y procesos ecológicos que inciden en la conservación de la diversidad biológica, de captación, almacenamiento, recarga y regulación hídrica que garantiza los servicios ecosistémicos. Prohíbe el desarrollo de actividades de exploración y explotación de hidrocarburos, así como la construcción de refinerías de hidrocarburos, las expansiones urbanas y suburbanas y la construcción de nuevas vías. Prohíbe el uso de maquinaria pesada para actividades agropecuarias, la disposición final, manejo y quema de residuos sólidos y/o peligrosos, la introducción y manejo de organismos genéticamente modificados y de especies invasoras, el uso de pirotecnia o sustancias inflamables, explosivas y químicas, la quema, tala (exceptuando aquellas que sean necesarias para garantizar la conservación de páramos y que cuenta con previa autorización), la fumigación y aspersión de químicos y se deberán eliminar paulatinamente en el marco de la reconversión de actividades agropecuarias, se prohíbe la degradación de la cobertura vegetal nativa y demás usos que resulten incompatibles con la conservación de estos

ecosistemas dentro del plan de manejos del páramo que se estén implementando o que ya se estén ejecutando. (Congreso Colombia, 2018).

## 5.2 TELEDETECCIÓN

La teledetección espacial supone una ampliación, en calidad y cantidad de la información aportada mediante la fotografía aérea. Es un procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella, asociado a las descripciones de tipos de cobertura de suelo, que genera un enorme impacto en el desarrollo de las investigaciones ecológicas ya que ayuda a mejorar la caracterización de la heterogeneidad del paisaje.

En términos de las ciencias de la tierra, se entiende que es una “técnica” que tiene por objeto la captura, tratamiento, y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales. La observación remota se da por la interacción de un flujo energético con las cubiertas terrestres. Dicho flujo es denominado radiación electromagnética.

El fenómeno de la teledetección es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres. El comportamiento reflectivo variable está condicionado por factores ambientales y características propias (físicas y químicas) en el momento de su obtención. (Pérez y Muñoz, 2002).

La teledetección posee un amplio espectro de aplicaciones que pueden ser decisivas en la toma de decisiones, estudios geodésicos, análisis de cambios en la cobertura vegetal, estudio de cuerpos de agua, entre otros, cuyos principales campos de acción se presentan en el análisis de crecimiento/decrecimiento de zonas urbanas, aplicaciones militares estratégicas, arqueología, explotación de recursos naturales, entre otras, que permiten un acceso rápido y una comprensión adecuada de la información, que favorece la realización de diferentes actividades a un estado o individuo. (Quintero, 2016).

## 5.3 IMÁGENES SATELITALES TIPO LANDSAT

Landsat es un grupo de satélites que se integraron en la primera misión de Estados Unidos para monitorear los recursos terrestres. Son imágenes captadas por estos satélites compuestas generalmente por 7 u 8 bandas espectrales escogidas con la finalidad de monitorear la vegetación, aplicaciones geológicas y estudiar los recursos naturales. Con la combinación de estas bandas se pueden generar nuevas imágenes e incrementar sus aplicaciones. (Alonso, 2015).

Antes de 1972 era considerada una idea visionaria el uso de satélites para la vigilancia terrestre, cartografía o simplemente para la exploración. Dicha idea se convertiría en el programa Landsat, constituido por una serie de misiones de observación de la Tierra mediante satélites operados por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Este programa fue revolucionario en cuanto a la forma de observar nuestro planeta. Desde 1972, año de su origen, esta serie de datos es la más larga y continua

que ha generado y registrando datos en cuanto a los cambios de la cobertura terrestre desde el espacio. (Ariza, 2013).

Actualmente, el programa se encuentra en la octava versión, es el octavo satélite de la serie Landsat y continuará suministrando datos e imágenes de observación de la tierra de mediana resolución. Periódicamente el programa se mejora y avanza en cuanto al registro de imágenes multiespectrales, mejorando la calidad de sus siete predecesores.

Tabla 1. Bandas espectrales según el tipo de satélite

LANDSAT 7		LANDSAT 8	
Banda	L7	Banda	L8
1	Azul	1	Costera
2	Verde	2	Azul
3	Roja	3	Verde
4	NIR	4	Roja
5	SWIR1	5	NIR
6	TIR	6	SWIR1
7	SWIR2	7	SWIR2
8	Pancromatica	8	Pancromatica
TIRS	Termica – Infraroja	9	Cirros
SWIR	Infraroja – Corta	10	TIRS1
NIR	Infraroja - Cercana	11	TIRS2

Fuente: Quintero, 2016.

La finalidad del proceso de combinación de bandas es mejorar la precisión para establecer algunos tipos de cobertura, a continuación, se presentan algunas de las combinaciones a tener en cuenta:

Tabla 2. Elementos detectados con combinaciones de bandas.

<b>Combinaciones de Bandas</b>	<b>Elementos detectados</b>
Falso color RGB 3, 4, 1	Zonas cubiertas de agua – Negro
	Vegetación vigorosa – Verde intenso
	Suelos desnudos – Rojo y rosado
	Zonas urbanas – Violeta
Falso color RGB 5,3,1	Vegetación – Marrón a negro
	Zonas urbanas – Azul claro a plateado
	Suelos desnudos y vías – Amarillo
Falso color RGB 4,3,2	Vegetación en tonos de rojo – rosado
	Cuerpos de agua – Azul oscuro a negro
	Presencia de nubes – Blanco

	Vegetación de páramo – Verde mate
Color natural 3,2,1	Aguas profundas – Azul oscuro
	Suelo desnudo – Amarillo a plateado
	Vegetación – Tonalidades verdes
	Nieve – Blanco
Falso color RGB 4,5,3	Cuerpos de agua - Azul
	Pastos húmedos – Naranja
	Cultivos – Verde fuerte
	Suelos desnudos – Azul claro
	Vegetación de paramo – Verde oliva
	Zonas urbanas – Azul claro-
Falso color RGB 7, 4, 2	Praderas y pastos – Verde claro
	Áreas forestales – Verde a verde oscuro
	Suelos desnudos – Rojo a rosado
	Vegetación de páramo – Verde mate

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2005.

#### 5.4 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES TIPO LANDSAT

La finalidad del procesamiento de imágenes digitales, es resaltar elementos que son difíciles de percibir o no se pueden distinguir en una imagen a simple vista. En este proceso se emplean varias bandas espectrales de un mismo satélite. Gracias a este preprocesamiento de imágenes, se busca la corrección de distorsiones de tipo radiométrica y geométrica, por medio de fórmulas matemáticas que alternan los niveles digitales de las imágenes satelitales para reajustar valores de brillo de los píxeles, debido a interferencias atmosféricas posicionamiento o funcionamiento de los instrumentos a bordo del satélite responsable. (Quintero, 2016).

5.4.1 Corrección radiométrica: es la eliminación de distorsiones del orden radiométrico, tales como ruidos, líneas, vacíos y efectos atmosféricos como neblina, variaciones en la iluminación solar, entro otros. Este proceso se realiza por medio de múltiples ecuaciones aplicadas a cada una de las bandas que componen la imagen satelital, transformando los valores digitales a radiancia, la cual posteriormente se transforma a valores de reflectividad atmosférica, permitiendo la remoción de distorsiones por medio de parámetros tales como la elevación solar y la humedad atmosférica, para finalmente ser recodificada a valores digitales. (Quintero, 2016).

Esta corrección implica, por una parte, la restauración de los píxeles o líneas perdidas, las cuales son detectadas y, por otra la corrección del bandeo de la imagen, el cual se debe a una mala calibración entre los detectores y resulta en la aparición periódica de

una banda más clara u oscura que en otras partes de la imagen. (Universidad de Murcia, 2003).

5.4.2 Corrección geométrica: es un proceso que conlleva la transformación de las coordenadas de los píxeles de la segunda imagen, de tal forma que coincidan de manera precisa con las de la primera. Se realiza mediante una transformación polinomial de segundo grado que se obtiene a partir de un conjunto de pares de punto de control de ambas imágenes. Este proceso se lleva a cabo en tres importantes pasos: localización de puntos de control, transformación de coordenadas y la transformación de niveles de gris. (Ambrosio, González y Arévalo, 2002).

5.4.3 Combinación de bandas: para el procesamiento de imágenes satelitales se trabaja con varias bandas espectrales, aunque existe una opción para trabajar en modo multisensorial o multitemporal de modo que el número de bandas se amplíe. Cuando se emplea esta opción para trabajar en el procesamiento de imágenes satelitales, se pueden diferenciar algunos objetivos mediante la combinación de dos o más bandas espectrales o también, resulta fácil eliminar la información innecesaria y reducir la cantidad de información. (Elizondo y Palafox, 2002).

5.4.4 Clasificación no supervisada: es un proceso mediante el cual se pueden definir las clases espectrales y la cantidad la define el usuario dependiendo de la extensión del lugar. Se recomienda trabajar con un número mínimo de 16 clases espectrales para poder realizar una clasificación bien detallada para el modelamiento. La intervención del usuario en este paso influye directamente en determinar manualmente el tipo de cobertura de suelo según los colores de las clases espectrales

## 5.5 ÍNDICES DE VARIABILIDAD PARA ESTIMAR LA DEGRADACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL

4.5.1 Índice de vegetación remanente (IVR): es el encargado de expresar la cobertura de vegetación natural de un área como porcentaje total de la misma. Es necesario calcular este índice para cada una de las coberturas naturales presentes en el área de estudio. Se calcula con la siguiente norma:

$$IVR = (AVR / At) * 100 \quad (1)$$

Donde:

IVR: índice de vegetación remanente.

AVR: área de vegetación remanente.

At: área total del área de estudio.

La interpretación de este índice se basa en su resultado (porcentaje). Cuando el descriptor es <0.01 su calificación es 20 y es mínima, cuando el porcentaje del rango esta entre 0.01 y 0.1 su calificación es 15 y es poca, cuando se encuentra entre 0.1 y 1 el resultado es 10 y es moderada, cuando califica entre 1 y 10 califica 10 y es fuerte, cuando se encuentre entre 10 y 100 califica 0 y es extrema. (Minambiente, 2014).

4.5.2 Indicador de las tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra: es un indicador que mide los cambios ocurridos en la cobertura vegetal, ya sean perdidas o ganancias de las mismas, a partir de un análisis de un período de tiempo no menor a 10 años. Con este índice, se puede estimar la degradación o la conservación de la cobertura vegetal. (Minambiente, 2014.). Se calcula de la siguiente manera:

$$TCCN = \frac{\ln(ATC_2 - ATC_1) * 100}{(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

Donde:

TCCN: indicador de las tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra.

ATC2: área de la cobertura en el momento final (año final del estudio multitemporal).

ATC: área de la cobertura en el momento inicial (año inicial del estudio multitemporal).

T2: tiempo final del estudio (año).

T1: año inicial del estudio (año).

El resultado de este índice, al estar expresado en porcentaje, indica:

- 0 a 10%: Baja.
- Entre 11 y 20%: Media.

- Entre 21 % y 30 %: medianamente alta.
- Entre 31 % y 40 %: alta.
- Mayor a 40%: muy alta.

4.5.3 Tasas anuales de cambio: proceso mediante el cual se pueden estimar los cambios de cobertura y uso del suelo para un estudio multitemporal, como, por ejemplo, en una investigación que busque conocer la degradación de la cobertura vegetal. Se puede calcular a partir de las superficies correspondientes a las coberturas que se encuentran representadas espacialmente en los mapas. (Camacho-Sanabria et al., 2015). Esta tasa anual de cambio se calculó en base a la ecuación de la FAO:

$$t = \left( \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{1}{n}} \right) - 1 \quad (3)$$

Donde:

S2: superficie de un tipo de cobertura al final del estudio.

S1: superficie de un tipo de cobertura al inicio del estudio.

N: número de años transcurrido entre el inicio y el final del estudio.

Este índice se expresa en porcentaje, por tal motivo, cuando resulta de manera negativa se estima que la cobertura se ha ido degradando, mientras que si resulta positiva se deduce que la cobertura ha ganado extensión en comparación a su situación inicial.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación usa una metodología descriptiva, que le permite analizar las imágenes satelitales que se recolectaron para la investigación, las cuales retratan el lugar de estudio en el período de tiempo comprendido entre los años 1986 y 2020. A partir de la recolección de información, imágenes satelitales y cartografías, se procedió a realizar la descripción sobre el estado de los páramos en esos períodos de tiempos, teniendo en cuenta la bibliografía consultada y los conocimientos previos de los investigadores, para finalmente elaborar un plan de acción en el que se exprese de manera descriptiva los pasos a seguir para la restauración del suelo, a partir de los resultados encontrados y presentados.

### 6.2 MATERIALES Y HERRAMIENTAS

De acuerdo con los objetivos trazados para el desarrollo de este proyecto de investigación, se emplearon las siguientes herramientas para su correcta realización:

Libros y publicaciones: fueron de vital importancia en el momento que se requirió el apoyo de teoría para la correcta resolución del proyecto.

Computador: fue el elemento material principal, en donde se consultó, organizó, procesó y analizó toda la información del proyecto.

Software ArcGIS: programa necesario para el procesamiento de la información como el DEM, imágenes satelitales y el respectivo análisis de la información.

Excel: se usó para ordenar, procesar y analizar los datos del IDEAM, entre otros.

Word: permitió organizar la información para presentar los resultados finales de la investigación.

Imágenes satelitales tipo Landsat: fue el elemento más importante del proyecto, ya que son necesarias para determinar el tipo de cobertura vegetal de la zona de estudio y con base en esos resultados, establecer el plan de mitigación.

Envi: software especializado en la teledetección y procesamiento de imágenes satelitales, cuya principal función es realizar las distintas correcciones a imágenes LandSat y así, propiciar el mejor aprovechamiento de éstas y la correspondiente obtención de resultados con alto porcentaje de eficacia.

### 6.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

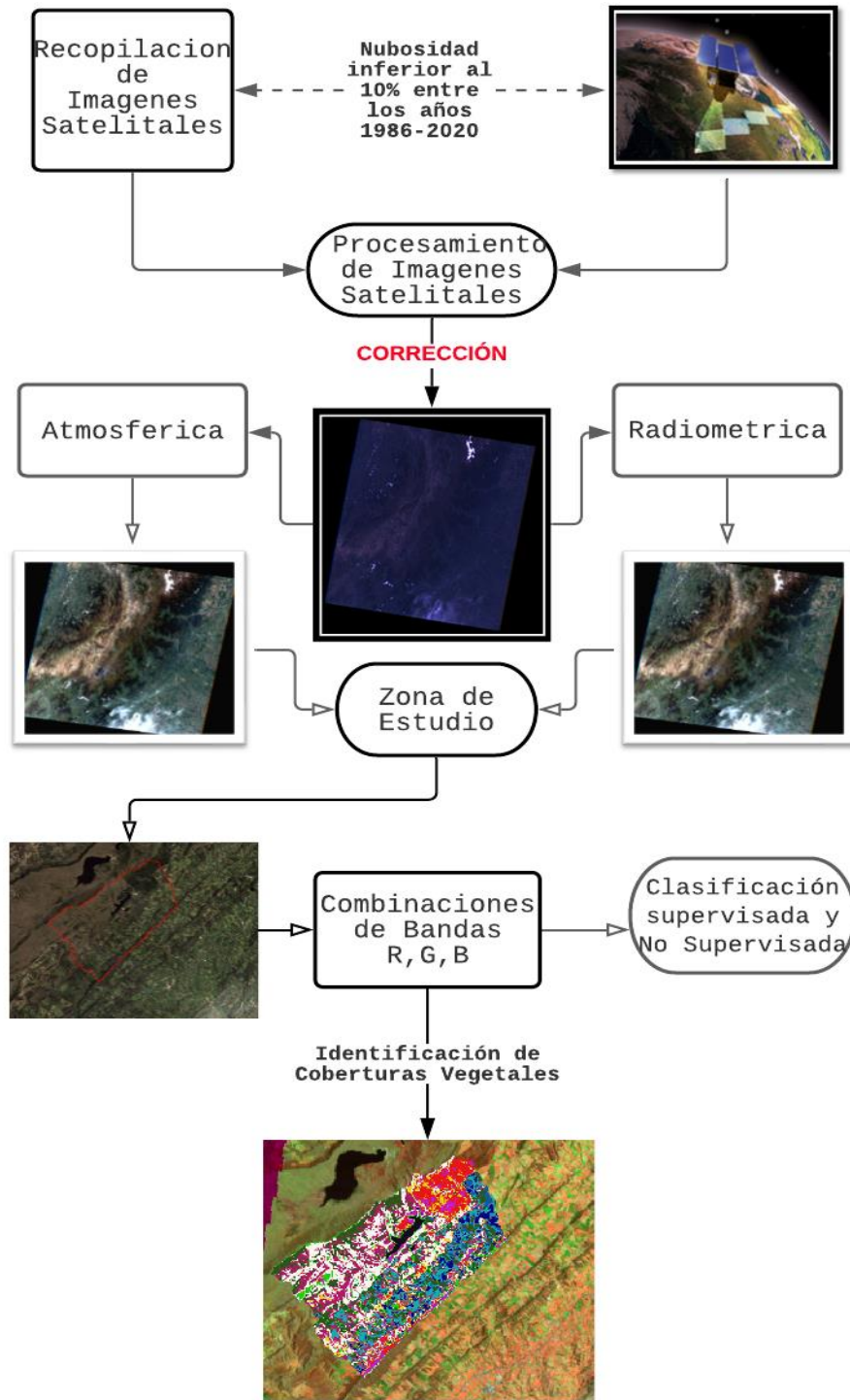
La ejecución de este proyecto de carácter investigativo, se lleva a cabo en tres etapas distintas: la primera fase es en la cual se reúne y procesa toda la información para lograr identificar el nivel de cobertura del suelo. A las imágenes se les hizo su respectiva corrección radiométrica y atmosférica mediante ENVI. En seguida, se hizo una clasificación no supervisada para determinar las coberturas y sus correspondientes áreas en ArcGIS, las cuales permitieron identificar las zonas que requieren la intervención para poder mejorar las funciones hídricas que brindan a las comunidades cercanas y poder priorizarlas en el plan de manejo ambiental.

### 6.3.1 Análisis a través del tiempo de la cobertura vegetal

- **Recolección de la información:** uno de los primeros requisitos que exige la modelación hídrica de la subcuenca San José, es la generación de material gráfico sobre las coberturas vegetales para los años de estudio. Este proceso se inicia con la obtención de las imágenes satelitales mediante la plataforma Earth Explorer de USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), teniendo en cuenta para su selección que cumplieran criterios de calidad como un porcentaje de nubosidad inferior al 5% dentro del terreno en estudio y la integridad en la imagen.
- **Procesamiento de imágenes:** una vez se tienen las bases de datos climatológicas para poder llevar la información de forma ordenada, se verifica que no puede llegar a generar ningún error por digitalización en la fase final del proyecto. El primer paso para el procesamiento de imágenes, da inicio en una corrección geométrica que permita tener la certeza de la ubicación de la imagen. Se toma como punto de referencia a los cuerpos de agua. El segundo paso lleva a la corrección radiométrica, la cual es utilizada para eliminar vacíos de información y otros errores generados por causas atmosféricas. Finalmente se procede a guardar la información de forma ordenada para su posterior utilización.
- **Clasificación no supervisada:** una vez se tenga procesada, corregida y clasificada toda la información recolectada, se genera la cartografía correspondiente del mapa de uso de suelos de cada uno de los años escogidos, con el fin de detallar la transformación a lo largo del tiempo y se elabora el mapa de la información cronoestratigráfica del suelo. Se debe delimitar mediante un shape en el cual esté la cuenca San José, con ayuda de la herramienta “Extract By Mask”, en la opción “Spatial Analyst” del software ArcGIS. Se generaron 16 categorías en relación a cada pixel, con ayuda de la opción “Iso Cluster Unsupervised Classification”, arrojando como resultado un ráster que contiene 16 tipos de cobertura vegetal, entre las cuales se pueden distinguir categorías “similares” en cuanto a características, llevando a hacer una corrección manual con ayuda de la imagen original y el shape que contiene las 16 categorías, pero en modo polígono para tener una mayor confiabilidad en los datos y poder obtener una buena calibración en el modelo.

Mediante la herramienta "Conversion Tools", usando la opción "Ráster To polygon", en la base de datos es almacenada toda la información que se generó de los polígonos. En seguida se debe editar el shape generado y clasificar elementos cuya identificación es rápida y fácil en objetos tales como cuerpos de agua, zonas urbanas, vías y/o caminos, zonas de nevados y nubes para así, poder generar el polígono correspondiente a la cobertura vegetal. Después, se obtiene un solo polígono por cobertura como resultado final, mediante la herramienta "Dissolve", en "Data Management Tools". Para finalizar este paso, se identifican las coberturas vegetales con el respectivo cuidado, ya que algunas zonas son muy similares a simple vista pero si no son clasificadas con el debido cuidado, pueden generar alteraciones al momento de calibrar el modelo, por lo que se realizaron diferentes tipos de combinaciones de bandas sugeridas en (IGAC, 2005), el cual fue necesario como guía para poder identificar un tipo de cobertura, aplicar distintas combinaciones de bandas y así, tener certeza en los resultados de clasificación.

Figura 1. Flujo de la metodología del procesamiento de imágenes.



## 6.4 METODOLOGÍA DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL

Los páramos son ecosistemas que cumplen con diferentes e importantes servicios naturales (Sarmiento et al., 2013), es por eso, que, si algo dentro de este sistema cambia, todos sus componentes se ven afectados. Los ecosistemas tienen la facultad de regenerarse por sí solos cuando el disturbio es retirado de la zona y a este proceso se le conoce como restauración pasiva. Es por este motivo que el primer paso para poder iniciar la restauración de una zona afectada por distintos factores antrópicos, se debe hacer el retiro del tensionante. (Vargas et al., 2012).

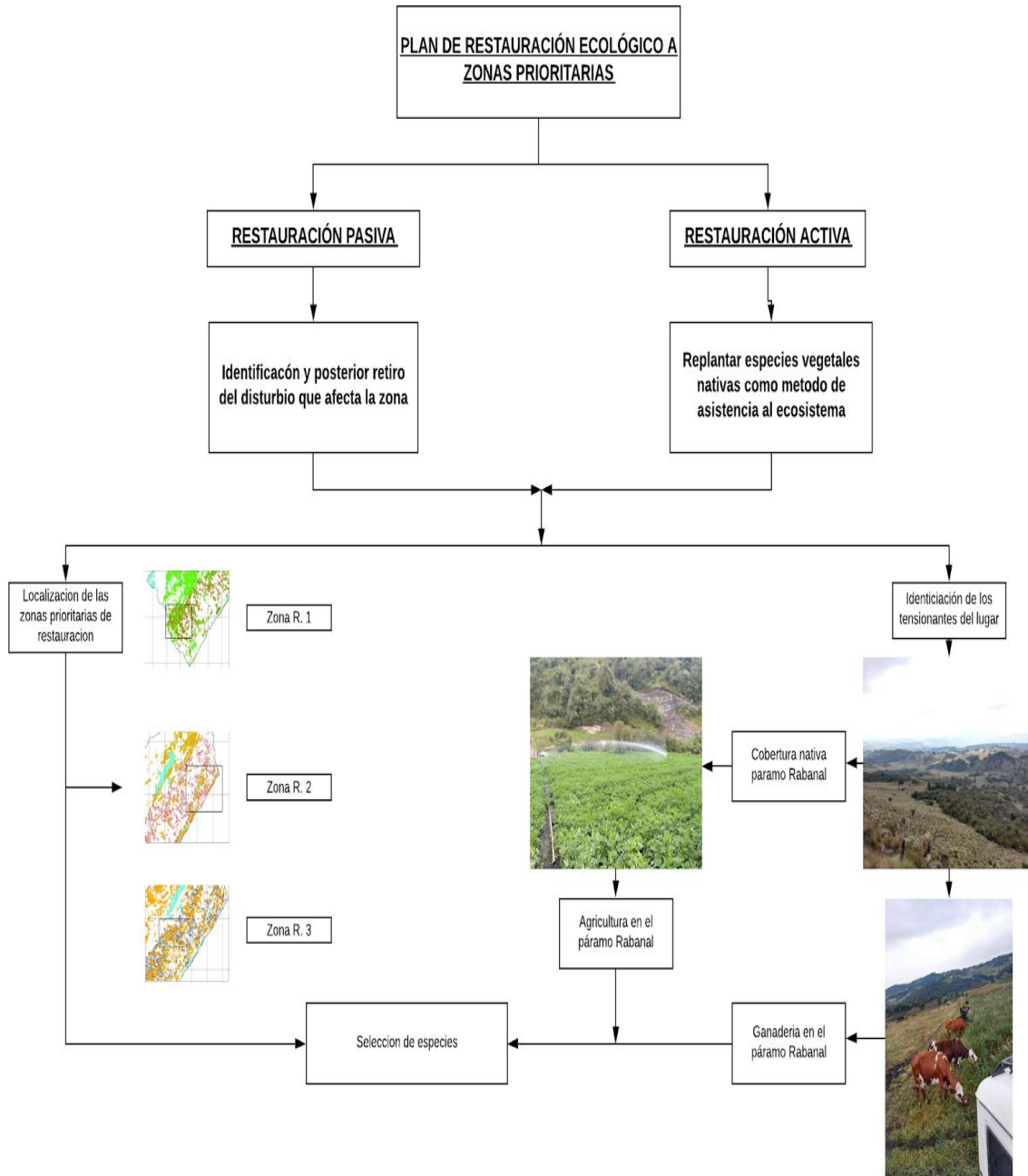
Cuando un ecosistema se ha visto muy afectado y ha perdido totalmente sus facultades de regeneración pasiva, es necesario ayudarlo en su proceso de recuperación o actividad. A esta metodología de restauración se le conoce como restauración activa, esto significa que el ser humano asiste al ecosistema para reestablecer los procesos de recuperación y paralelamente, la superación de los factores que impiden su regeneración. (Vargas et al., 2012).

6.4.1 Localización de las áreas prioritarias de restauración: mediante la clasificación supervisada y no supervisada de las imágenes satelitales de los diferentes años de estudio (1986, 1992, 2000, 2007, 2015, 2020), se pudieron establecer las diversas capas de cobertura vegetal de la zona de estudio. A partir de esta información, se analizaron año por año y se cuantificó la pérdida de la capa con el pasar del tiempo en este período de estudio. Para priorizar las áreas más afectadas se debió localizar aquellas en donde se evidenció un tipo de cobertura nativa (las de 1986, ya que es el primer año de estudio de la investigación), que con el pasar de los años en la zona de estudio, se observó un cambio notable de cobertura vegetal. Dicho cambio está relacionado con actividades socioeconómicas como la agricultura, ganadería y/o invasión de especies intrusivas que afectan directamente las funciones que presta el ecosistema al área circundante.

6.4.2 Identificación del disturbio en las zonas a restaurar: es importante antes de proponer una cobertura vegetal para alguna zona prioritaria, identificar plenamente el disturbio presente en la zona, ya que las actividades mencionadas afectan de diversas formas el suelo, haciendo que esté presente distintas alteraciones según el tensionante y no con todas las especies se puede llegar a obtener el éxito deseado. Para que, al obtener el mayor disturbio presente en la zona, se desarrolle un plan de acción que contemple el comportamiento del efecto nocivo y su retención en el área.

6.4.3 Selección de especies vegetales: este es un paso de vital importancia para el éxito de la restauración del ecosistema. Para la selección de especies vegetales de las zonas prioritarias se tuvieron en cuenta las especies nativas del sector que en algún momento estuvieron presentes y se vieron removidas por los diversos disturbios que tienen en peligro estas zonas. Además de ser beneficioso para la cobertura vegetal, diversos estudios sugieren la repoblación de la fauna silvestre del lugar con el replanteo de la cobertura nativa del lugar.

Figura 2. Flujograma del plan de manejo ambiental.



## 7. DESARROLLO DEL PROYECTO

Para una fácil presentación de los resultados de este proyecto se dividió en distintas etapas, tomando como punto de partida los años modelados 1986, 1992, 2000, 2007, 2015 y 2019. Los resultados de calibración de los distintos modelos seguirán la secuencia desde el año más antiguo hasta el más reciente. En la sección de anexos se podrán consultar los demás resultados de la modelación.

### 7.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio fue delimitada mediante el software ArcGIS, tomando como referencia la estación hidrológica del IDEAM San José, de código 35077100, ubicada en el municipio de Samacá, Boyacá, la cual está ubicada sobre la corriente del río Teatinos, directo afluente del río Garagoa. La cuenca San José cuenta con un área total de 3007.5 hectáreas, ubicándose entre los municipios de Samacá y Ventaquemada, ambos ubicados en el departamento de Boyacá. Además, comprende una parte del Páramo Rabanal. Se usaron coordenadas proyectadas UTM WGS 1984 Zona 18 Norte. Debido a que las estaciones circundantes al área de estudio tenían muchos datos faltantes, luego del primer año de referencia se tomó como referencia la estación en mención.

Las 3007 hectáreas que comprende la cuenca San José, están divididas entre Ventaquemada con un total de 1875.2 hectáreas y 1131.8 hectáreas al municipio de Samacá.

En la zona de estudio, sobre los 3250 m.s.n.m se encuentra ubicado el embalse Teatinos, con una capacidad de 8 millones de metros cúbicos (Equipo de Gobierno, 2020). De igual forma, dentro de la zona de estudio está ubicada la corriente hídrica del río Teatinos.

La estratégica ubicación de estos dos municipios, sumado con la gran riqueza hídrica y ambiental del sector, hace que sea propicio para desarrollar actividades mineras, de pesca, ganadería y agricultura. El desarrollo de estos dos municipios ha venido de la mano de la agricultura y la gran cercanía con los corredores viales principales del país, facilitando la comunicación con Tunja y Bogotá. Esto sin duda, ha ayudado a que los sectores primarios y terciarios sean de bastante importancia en la economía de estos dos municipios. En la historia destaca la fábrica textil y la hidroeléctrica que en algún momento abasteció a la capital boyacense desde Samacá. (Alcaldía Municipal de Samacá, 2018).

### 7.2 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA SAN JOSÉ MEDIANTE ARCMAP

La delimitación de la zona de estudio se realizó con el fin de identificar el área de captación del río Teatinos. Dicho trabajo se hizo mediante el software ArcMap, el cual requería un DEM de la plataforma USGS y el shape de estaciones meteorológicas del

IDEAM para identificar el punto de salida de la cuenca. Se tomó como referencia la estación San José ubicada en el municipio Samacá.

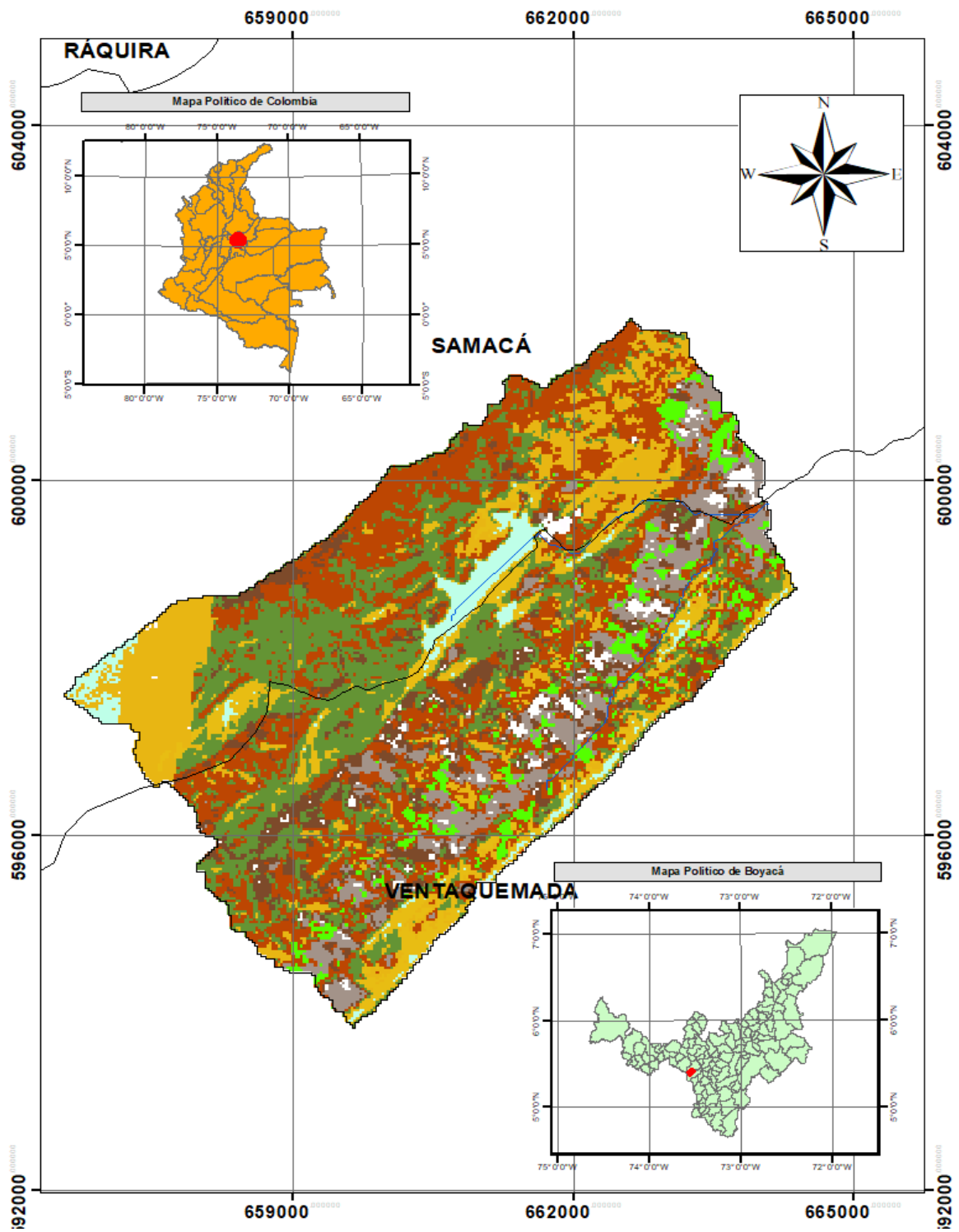
Una vez cargado el DEM en el software de delimitación, en la opción ArcToolbox/Spatial AnalystTools/Hydrology/FlowDirection/CargarDEM/Ok/ nuevamente en la opción Hydrology de ArcToolBox/FlowAccumulation/CargarFlowDirection/Ok, esta opción permite al usuario identificar las principales causas de agua y el punto de descargue de agua de la cuenca. Se ingresa el shape en donde se encuentra cargada toda la información de la estación San José, para establecer que el punto de la estación se encuentra ubicado sobre el cauce correcto que identificó ArcMap mediante la opción del Flow Accumulation, en seguida, con la ayuda de ArcToolBox/SpatialAnalystTools/Hydrology/Watershed/ingresarFlowDirection/ingresar punto de la estación/Ok y se obtiene la delimitación de la unidad hidrográfica.

### 7.3 ANÁLISIS DE LA COBERTURA VEGETAL A TRAVÉS DEL TIEMPO

Una vez seleccionadas y obtenidas las imágenes necesarias para el desarrollo del proyecto, fue necesario pasar estas imágenes por una serie de procesos con el fin de asegurar que dichos insumos se encuentren en la posición correcta respecto a las otras, para que al momento de realizar los mapas de coberturas no se generen conflictos y/o confusiones con otros tipos de coberturas vegetales, así mismo, se puede eliminar cualquier tipo de disturbio como alteraciones de tipo atmosférico, ruido y vacíos.

Para la zona de estudio cuenca San José, ubicada entre la vereda Montoya, sector Matanegra, de Ventaquemada y la vereda Salamanca, de Samacá, se obtuvieron imágenes satelitales tipo Landsat 5, 6, 7 y 8 (Aguilar, Mora y Vargas, 2015), a través de Earth explorer con un porcentaje de nubosidad inferior al 10 %. En el momento de la toma de la imagen, la energía captada por un sensor remoto por una serie de interacciones que deben ser comprendidas para procesar los datos adecuadamente. (Administración de Parques Nacionales, 2005).

Figura 3. Localización de la zona de estudio



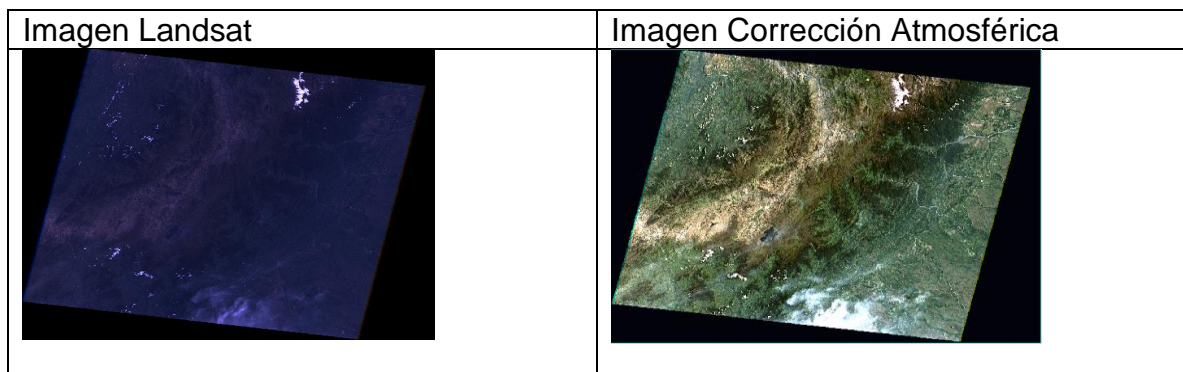
Por esta razón, es necesario aplicar algunas correcciones previas en base al proceso, para realizar un correcto análisis e interpretación de información de las imágenes. Por lo que en el análisis multitemporal de la degradación del suelo en la cuenca San José, se realizaron las correcciones radiométricas y atmosféricas.

7.3.1 Corrección atmosférica: esta corrección se realiza utilizando la información explícita, ya que es de diferentes bandas de una imagen multispectral y la dispersión aumenta inversamente con la longitud de onda. Los canales se verán afectados de un modo diferente al igual que su almacenamiento en números digitales, los cuales tienen una forma de almacenamiento artificial de cada sensor, pueden ser de 8, 12 y 16 bits respectivamente. (Aguilar, Mora y Vargas, 2015). Esta información corresponde a la cobertura derivada de la intensidad de radiación electromagnética, la misma que proviene de la luz solar reflejada sobre la superficie terrestre sumada a la energía dispersada y reflejada por la atmósfera conocida como radiancia.

La corrección atmosférica busca recuperar la radiancia intrínseca del objeto de estudio obtenida de la señal recibida por el sensor. Para ello es necesario en primera medida, convertir los ND de cada banda a valores de radiancia (L), en segunda instancia la radiancia se transforma a valores de reflectividad en el techo de la atmósfera "Top of atmosphere" (TOA) y como paso final se obtiene mediante File/Openas/Landsat/GeoTIFF with Metadata. Toolbox/RadiometricCorrection/ImagenMTL/OK. Para guardar el archivo saliente, se usa la opción (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), que es un módulo avanzado de corrección atmosférica disponible en el software ENVI, el cual está basado en el algoritmo de transferencia de radiación y caracterización de las bandas y parámetros del sensor.

En algunos estudios multitemporales, cuando se comparan las propiedades, magnitudes, entre otros, en algunas fechas diferentes, la atmósfera cambia de una fecha a otra y es cuando se deben corregir los valores de radiancias registradas por el sensor para cada una de las bandas.

Figura 4. Corrección atmosférica en imagen Landsat con ENVI.



7.3.2 Corrección radiométrica: la radiancia capturada por el sensor remoto que está a bordo del satélite no es completamente efectivo, en comparación a la escena real detectada. Esto se debe a que la energía (radiancia) captada por el sensor está regida por la irradiancia del sol, la reflectividad de la cubierta terrestre y de las condiciones intrínsecas del sistema para la captura de la información (Alzate y Sánchez, 2018). Estas anomalías se encuentran en los valores de niveles digitales y píxeles que componen la matriz de datos (Administración de Parques Nacionales, 2005). Este proceso es relativamente simple y estas operaciones reducen las alteraciones, dando fin a un producto de datos de radiancia verdadera y características espaciales del área. Este proceso fue realizado bajo el software ENVI versión 5.3.

Esta corrección implica la calibración y restauración de los píxeles o líneas negras que ocurrieron a partir del año 2003 en el satélite LandSat 7. Se realizó el llenado de bandas o Gapfill y los resultados se ven expuestos a continuación. (Correcciones, 2003).

Figura 5. Imagen Landsat 7 SLC Off, antes y después del GapFill

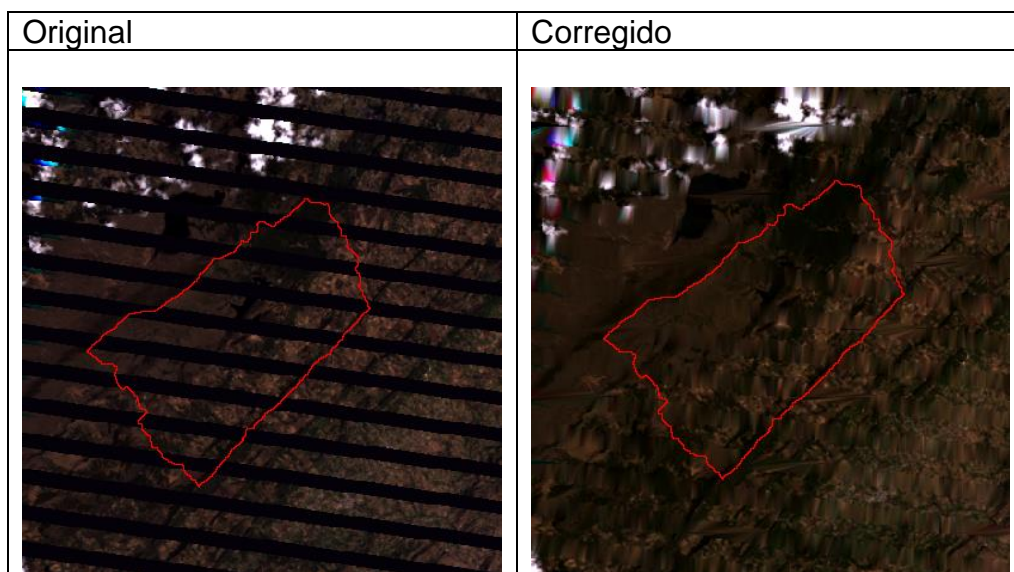
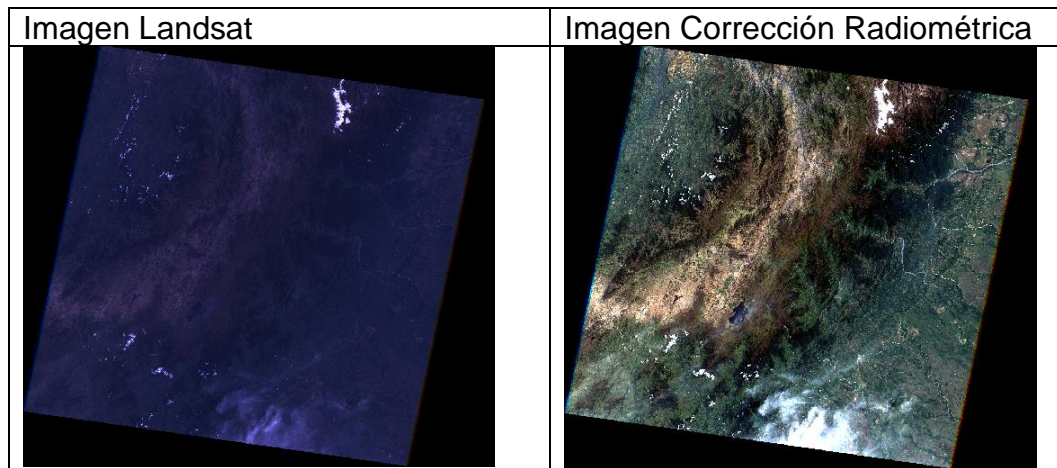


Figura 6. Corrección radiométrica en imagen Landsat con ENVI.



7.3.3 Clasificación no supervisada: cuando las imágenes de las figuras 3 y 4 ya han pasado por el proceso de las respectivas correcciones, se realiza la clasificación de las coberturas vegetales, con ayuda del software ArcMap, versión 10.3, en la caja de herramientas, geoprocessing/ Arctoolbox/ Spatial Analyst Tools/ Multivariate/ Iso Cluster/ selección de la imagen a clasificar/ Number Of Classes (para el caso de este proyecto se hizo un corte de 16 clases de coberturas)/ Ok Archivo Saliente, estos 16 tipos de coberturas fueron designados por el programa en toda la imagen y por cada valor diferente que existe en cada pixel. Cuando finaliza este paso de asignación de coberturas se procede en Multivariate/ Maximum Likelihood Classification/ Imagen seleccionada para clasificar/ Input Signature File, selección de archivo anterior saliente (.gsg) / Ok.

Al obtener el resultado de la clasificación no supervisada que realiza el software, se debe hacer una interpretación visual, paso en el cual se designará a cada número de clase su respectiva cobertura vegetal, con ayuda de las diferentes combinaciones de bandas que permite ArcGIS.

Figura 7. Clasificación no supervisada con tipos de cobertura

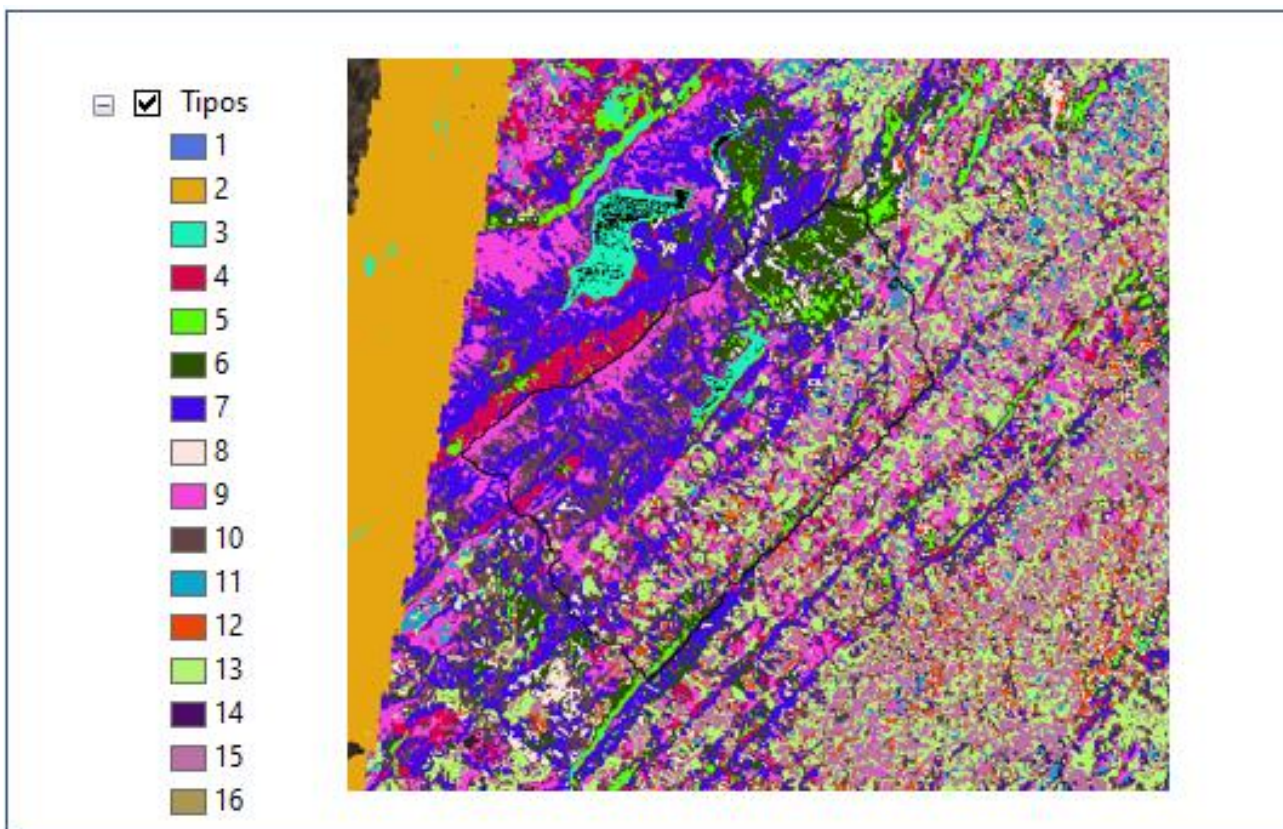






Tabla 3. Combinaciones de banda y representación en la zona de estudio.

Combinación y descripción de bandas	Imagen
<p>Color Real (3,2,1)</p> <p>Las bandas visibles dan respuesta a la luz que ha penetrado, y con claridad se detectan de colores oscuros, los cuerpos de agua y vegetación de color verde.</p>	

<p>Falso Color (4,3,2)</p> <p>Esta combinación de bandas aumenta la claridad y permite detectar zonas de vegetación como, por ejemplo, bosques naturales de color rojo magenta.</p>	
<p>Falso Color (4,5,3)</p> <p>Principalmente se detectan los cultivos pertenecientes a tubérculos como la papa. Con el color naranja y color café se identifican las zonas de bosque intenso</p>	
<p>Falso Color (7,4,2)</p> <p>Esta combinación permite observar de color verde mate la vegetación de páramo y de color rojo a los suelos desnudos.</p>	

Falso Color  
(3,4,1)

Esta combinación permite detectar de color verde intenso los arbustales intensos y zonas de cultivos.



Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2005.

Mediante este procedimiento se asignaron las coberturas resultantes de los 16 tipos de coberturas solicitadas al software. Finalmente se consideraron 8 tipos de cobertura vegetal presentes en la zona de estudio: cuerpos de agua, bosque mixto, vegetación de páramo, cultivos, suelos desnudos y pastos. Cabe destacar que al momento de descargar las imágenes con las cuales se trabajó, se configuró de tal manera que estas imágenes al momento de la búsqueda las clasificara en cuanto al índice de nubosidad menor al 10 %, lo que facilitó la interpretación visual de las imágenes. El paso a seguir consistió en realizar el corte para la zona de estudio que se lleva a cabo en ArcMap, el cual brinda la herramienta para recortar la zona de interés. Para cortar la zona de interés en el programa se deben seguir los siguientes pasos: caja de herramientas/ Geoprocessing/ ArcToolBox/ Data Management Tools/ Ráster/ Ráster Processing/ Clip, en el caso de este proyecto fue la zona de la cuenca San José con inmediaciones al río Teatinos.

Figura 8. Extracción de zona de estudio mediante la herramienta "Clip"





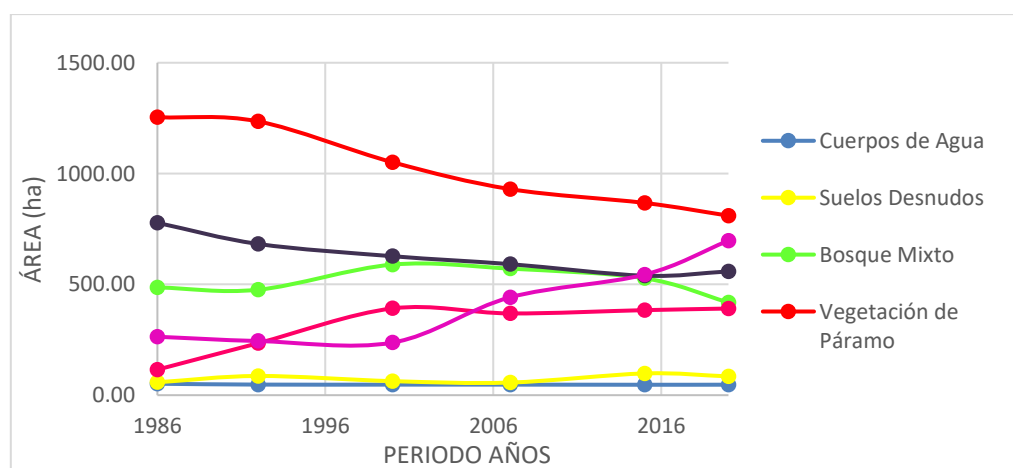
de poder comprender las pérdidas y ganancias que se observan según la clasificación de las coberturas vegetales.

Tabla 4. Análisis multitemporal cuenca San José 1986 – 2020

COBERTURA VEGETAL	Año 1986		Año 1992		Año 2000		Año 2007		Año 2015		Año 2020	
	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%	Area (ha)	%
Cuerpos de Agua	51.63	2%	47.76	2%	47.61	2%	47.64	2%	47.03	2%	47.24	2%
Suelos Desnudos	58.23	2%	86.62	3%	63.25	2%	56.97	2%	98.03	3%	84.69	3%
Bosque Mixto	486.20	16%	475.89	16%	589.22	20%	570.91	19%	527.69	18%	418.45	14%
Vegetación de Páramo	1254.41	42%	1235.35	41%	1051.08	35%	929.89	31%	867.57	29%	810.11	27%
Arbustal Bajo	777.67	26%	682.41	23%	627.06	21%	591.24	20%	539.10	18%	558.45	19%
Pastos	115.31	4%	234.64	8%	391.58	13%	368.97	12%	383.73	13%	390.89	13%
Cultivos	263.63	9%	244.42	8%	237.29	8%	441.46	15%	543.93	18%	697.25	23%
Total	3007.08	100%	3007.08	100%	3007.08	100%	3007.08	100%	3007.08	100%	3007.08	100%

El análisis multitemporal de la cobertura vegetal de la cuenca San José, en un intervalo de 34 años, entre 1986 y 2020, denota que los factores antrópicos que aquejan la zona se ven reflejados en la disminución de las coberturas nativas. La cobertura que ha presentado una mayor disminución ha sido la cobertura de vegetación de páramo, con 444.3 ha perdidas en este intervalo de tiempo, lo cual corresponde a una pérdida de cobertura del 14.7 %. El arbustal bajo que es una vegetación nativa de la zona, ha perdido 219,2 ha, lo que representa una disminución del 7.29 %. Los bosques mixtos también se han visto afectados, presentando un porcentaje de pérdida del 2.24 %, equivalente a 26.5 ha. Las coberturas que se han visto en notable aumento han sido en primer lugar los cultivos, debido a que la zona es una de las mayores productoras de papa del país, con una ganancia de 433.62 ha, equivalente a un incremento del 14 %. Los pastos también reflejan un incremento considerable con 275.6 ha, que representa un incremento del 9.17% de cobertura, una de las posibles causas es la ganadería expansiva y finalmente, los suelos desnudos presentan un incremento de 26.45 ha.

Figura 10. Variación de la cobertura vegetal, período 1986 – 2020



7.4.1 Tasa anual de cambio para la cobertura vegetal cuenca San José: como refleja la tabla 5, la cobertura que se vio más afectada fue la cobertura de vegetación de páramo con un porcentaje de tasa de cambio de pérdida del 1.278 %, seguido por el arbustal bajo con pérdidas de 0.969 % y el bosque mixto con pérdidas de cobertura vegetal del 0.440 %. Las coberturas que obtuvieron ganancias a lo largo del tiempo fueron las coberturas relacionadas con los factores antrópicos relacionados a la agricultura, los pastos para consumo ganadero y los suelos desnudos que pueden ser utilizados para cultivos de agricultura o para la ganadería.

Tabla 5. Tasas anuales de cambio de la cobertura vegetal cuenca San José.

<b>TASAS ANUALES DE CAMBIO (1986-2020)</b>			
COBERTURA	ÁREA 1986 (ha)	ÁREA 2020 (ha)	TASA DE CAMBIO (%)
Cuerpos de Agua	51.633	47.236	0%
Suelos Desnudos	58.229	84.688	1%
Bosque Mixto	486.199	418.455	0%
Vegetación de Páramo	1254.407	810.107	-1%
Arbustal Bajo	777.669	558.451	-1%
Pastos	115.315	390.894	4%
Cultivos	263.631	697.254	3%

Se calcularon las tasas anuales de cambio de cobertura vegetal en comparación con los datos obtenidos de los años analizados de la siguiente manera: 1986 y 1992, 1992 y 2000, 2000 y 2007, 2007 y 2015, 2015 y 2020. De dicha comparación, se puede deducir que en cada intervalo de tiempo las coberturas nativas iban disminuyendo y las que se relacionan con factores que no deben estar presentes en estas importantes zonas se iban haciendo presentes con el pasar del tiempo, a continuación, se puede observar el cálculo período a período.

En la siguiente tabla se evidencia la pérdida año tras año de la cobertura vegetal, durante un periodo de 34 años. Se puede observar una pérdida progresiva de cobertura vegetal resaltada en negativo y con color rojo y en negro cuando la tasa de cambio fue positiva.

Tabla 6. Comparación de las tasas anuales de cambio de las áreas de coberturas vegetales

<b>Tasas Anuales de Cambio</b>					
COBERTURA VEGETAL	T.C 1986 - 1992 (%)	T.C 1992- 2000 (%)	T.C 2000 - 2007 (%)	T.C 2007 - 2015 (%)	T.C 2015 - 2020 (%)
Cuerpos de Agua	-1%	0%	0%	0%	0%
Suelos Desnudos	5%	-4%	-1%	7%	-2%

Bosque Mixto	0%	3%	0%	-1%	-3%
Vegetación de Páramo	0%	-2%	-2%	-1%	-1%
Arbustal Bajo	-2%	-1%	-1%	-1%	0%
Pastos	9%	7%	-1%	0%	0%
Cultivos	-1%	0%	8%	3%	3%

7.4.2 Tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra (TCCN): indicador mediante el cual se puede constatar el cambio de coberturas vegetales naturales del suelo partiendo desde un análisis multitemporal, no inferior a 10 años. En este caso, el estudio fue de un intervalo de 34 años, así mismo, se puede calcular el grado de conservación de la cobertura, cantidad de hábitad natural intacta y los patrones de conversión. (Minambiente, 2014).

$$TCCN = (Ln ATC_2 - LnATC_1) * 100 / (T_2 - T_1) \quad (4)$$

Donde:

TCCN: tasa de cambio de las coberturas vegetales en (%).

ATC<sub>2</sub>: área total en el momento dos o cobertura final.

ATC<sub>1</sub>: área total en el momento uno o cobertura inicial.

T<sub>2</sub> - T<sub>1</sub>: número de años entre el momento final (T<sub>2</sub>) y el momento inicial (T<sub>1</sub>).

Para el estudio de la tasa de cambio de las coberturas vegetales presentes en la zona de estudio de la cuenca San José, se definió un periodo de 34 años reflejados a continuación:

Tabla 7. Tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra (TCCN) 1986 – 2020

<b>TASA DE CAMBIO DE LAS COBERTURAS NATURALES DE LA TIERRA (TCCN)</b>					
COBERTURA VEGETAL	ÁREA 1986 (ha)	ÁREA 2020 (ha)	TCCN (%)	CATEGORIA	CALIFICACIÓN
Cuerpos de Agua	51,63	47,24	-1%	Baja	20
Suelos Desnudos	58,23	84,69	3%	Baja	20
Bosque Mixto	486,20	418,45	-1%	Baja	20
Vegetación de Páramo	1254,41	810,11	-3%	Baja	20
Arbustal Bajo	777,67	558,45	-3%	Baja	20
Pastos	115,31	390,89	9%	Baja	20
Cultivos	263,63	697,25	7%	Baja	20

Como se puede observar en la tabla de tasa de cambio de cobertura natural de la tierra (TCCN), los valores que están resaltados en rojo, hacen referencia a la degradación sufrida en algunas de las coberturas vegetales importantes y vitales para la zona de estudio y los valores de negro significan que dicha cobertura incrementó su extensión. La categorización de este indicador se muestra a continuación:

Tabla 8. Categorización de las tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra

<b>Categoría</b>	<b>Descriptor</b>	<b>Calificación</b>
Baja	Menor del 10%	20
Media	Entre 11-20%	15
Medianamente Alta	Entre 21-30%	10
Alta	Entre 31-40%	5
Muy Alta	Mayor 40%	0

Se puede destacar que, una de las coberturas que ha sufrido mayores pérdidas a lo largo del período analizado fue la vegetación de páramo y arbustal bajo con clasificación no baja, pero considerable y a tener en cuenta para restauración.

7.4.3 Indicador de vegetación remanente: este índice hace referencia al porcentaje total de cobertura natural de un área. Se calcula para cada una de las coberturas identificadas en la zona de estudio.

(5)

$$IVR = (AVR/AT) * 100$$

Donde:

AVR: área de la vegetación remanente.

At: área total de la unidad, en kilómetros, metros cuadrados o hectáreas.

Tabla 9. Indicador de vegetación remanente (IVR) 1986

COBERTURA	ÁREA2020 (ha)	IVR%	ESTADO
Cuerpos de Agua	47.24	2%	Natural
Suelos Desnudos	84.69	3%	Intervenido
Bosque Mixto	418.45	14%	Natural

Vegetación de Páramo	810.11	27%	Natural
Arbustal Bajo	558.45	19%	Natural
Pastos	390.89	13%	Intervenido
Cultivos	697.25	23%	Intervenido
Total:	3007.08	100%	

$$\text{IVR} = (2569,908\text{ha}/3007.084\text{ha}) * 100$$

$$\text{IVR} = 85.46 \%$$

Tabla 10. Indicador de vegetación remanente (IVR) 2020

<b>INDICADOR DE VEGETACIÓN REMANENTE (IVR)</b>			
COBERTURA	ÁREA <sup>1986</sup> (ha)	IVR %	ESTADO
Cuerpos de Agua	51.63	2%	Natural
Suelos Desnudos	58.23	2%	Intervenido
Bosque Mixto	486.20	16%	Natural
Vegetación de Páramo	1254.41	42%	Natural
Arbustal Bajo	777.67	26%	Natural
Pastos	115.31	4%	Intervenido
Cultivos	263.63	9%	Intervenido
Total:	3007.08	100%	

$$\text{IVR} = (2916.301\text{ha}/3007.084\text{ha}) * 100$$

$$\text{IVR} = 62.89 \%$$

Tabla 11. Indicadores del índice de vegetación remanente

Descriptor	Rango	Calificación
NT: no transformado o escasamente transformado. Sostenibilidad alta.	IVR $\geq$ 70%	20
PT: parcialmente transformado. Al menos el 70 % de la vegetación primaria permanece sin alterar. Sostenibilidad media.	IVR $\geq$ igual al 50% y < del 70%	15

MDT: transformado. media baja	medianamente Sostenibilidad	IVR $\geq$ a 30% y < del 50%	10
MT: muy transformado. Sostenibilidad baja.		IVR $\geq$ a 10% y < 30%	5
CT: transformado.	completamente	IVR < 10%	0

Fuente: Ministerio de Ambiente,

Los resultados correspondientes a los porcentajes del año de inicio de estudio (1986) fueron de un 85.46 %, lo cual quiere decir que la cobertura vegetal se encontraba en estado "No transformado o escasamente transformado, con una sostenibilidad alta con respecto al año 2020, el IVR disminuye considerablemente a 60.99 %, arrojando el rango PT: parcialmente transformado. El 70 % de la vegetación primaria permanece sin alterar (Sostenibilidad media). Aumentó considerablemente el deterioro de la cobertura vegetal afectando principalmente las coberturas de la vegetación de páramo, arbustal bajo y bosque mixto, mientras se dio un incremento considerable en las coberturas de agricultura y actividades de ganadería (pasto) en la zona de estudio.

En un periodo de 34 años (1986 – 2020), es evidente el cambio de porcentajes que tuvo la vegetación, con una disminución del 24.47 %, dejando claro que en algunos lugares de la zona de estudio es necesario implementar un plan de acción de restauración con la finalidad de ayudar al ecosistema y mejorar sus funciones hídricas.

## 8. PLAN DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN ZONAS DEGRADADAS

El plan de restauración ecológica para ecosistemas de páramos, es una actividad planificada que recupera un ecosistema que ha sufrido degradación y/o destrucción con respecto a su integridad y sostenibilidad en las funciones, bienes y servicios que ofrecen estos ecosistemas. Para la restauración de las zonas prioritarias, se propondrán coberturas vegetales de especies endémicas y de aquellas que ayuden a la repoblación de la fauna propia del lugar. (Sarmiento et al., 2013).

Este proceso antrópico busca ayudar al restablecimiento parcial o total de la estructura, función y composición de un ecosistema. El páramo se caracteriza porque la restauración está muy limitada y sus tiempos de regeneración son muy demorados. A pesar de que cualquier ecosistema se recupera por si solo cuando se quitan los tensionantes o actividades que afectan directamente sus funciones hídricas, este tipo de restauración para este ecosistema de páramo o alta montaña puede llegar a tardar mucho tiempo. Teniendo en cuenta que uno de los bienes que ofrece el páramo a la comunidad es la del agua, se debe asistir el ecosistema para ayudarlo de manera rápida y controlada.

El éxito de una restauración depende en gran medida del estado actual de las zonas a intervenir, la hidrogeología y la geomorfología, pero en este caso se pretende proponer una cobertura de suelo que ayude a mejorar específicamente la capacidad de regulación hídrica de la zona mediante la identificación de las zonas prioritarias de recuperación. Al identificar la principal cobertura vegetal y por la cual fue reemplazada, se puede proponer una nueva cobertura con especies endémicas y nuevas especies que faciliten la restauración y la repoblación de la fauna nativa del lugar, así como asegurar que las especies vegetales se puedan reproducir de forma fácil.

Las zonas que requieren una intervención se determinan comparando la cobertura vegetal registrada en el año 1986 y la cobertura registrada en el año 2015.

### 8.1 MAPA DE ZONAS DE INTERVENCIÓN

Se puede identificar que las zonas más afectadas son la vegetación de páramo y los distintos tipos de bosques nativos presentes en la zona, en donde ahora se presenta mayor intervención de actividades antrópicas: especialmente ganadería, la cual se caracteriza generalmente por la presencia de pastos, acompañada de la tala indiscriminada de madera para la delimitación de las zonas donde permanece el ganado; la agricultura, y la implantación de especies no nativas como el pino que desplazan la vegetación propia.

Es importante identificar en las zonas afectadas cuales son los disturbios presentes que están afectando los servicios ecosistémicos de la zona de estudio y retirarlos inmediatamente, debido a que todo ecosistema tiene la capacidad de rehabilitarse sin ayuda siempre y cuando no haya sido afectado gravemente, pero esto requiere de un largo período de tiempo, es por esto que se busca retirar las actividades no propias del

lugar y ayudar al ecosistema a recuperarse en un período de tiempo menor con el cambio de cobertura vegetal a especies propias del lugar.

## 8.2 SELECCIÓN DE ESPECIES

Tabla 12. Especies seleccionadas para restaurar zona de vegetación de páramo.

Especies seleccionadas para áreas de vegetación de paramo ZONA 1 actualmente disturbadas por factores antrópicos						
Disturbio	Macolla de pajonal	Lupinus Bogotensi	Calamagrostis effuse	Espeletita argentea	Espeletita Barclayana	Frailejón
Zona de cultivos	X	x	X	x	x	X
Ganaderia	X	x	X	x	x	X

La siembra de la especie Lupinus Bogotensi es considerada con la finalidad de ayudar al crecimiento y la adaptación de la Espeletita Argentea y las macolla de pajonal, especies nativas del páramo Rabanal. (Parra, 2013; Vargas et al., 2012).

Tabla 13. Especies seleccionadas para restaurar zona de Bosque nativo.

Especies seleccionadas para áreas de Bosque ZONA 3 actualmente disturbadas por factores antrópicos					
Disturbio	Lochroma Fuchsioideas	Solanum Syconphantas	Montanoa Quadrangularis	Cecropia Angustifolia	Clethra fagifolia
Zona de cultivos	X	X	X	x	X
Ganaderia	X	X	X	x	X

Este plan de manejo ambiental, para las zonas afectadas de bosque, tomó en cuenta la vegetación nativa del páramo y se propusieron esas coberturas vegetales al encontrar resultados positivos en otros planes de restauraciones ecológicas y al ser vegetación propia de la zona de estudio. (Parra, 2013).

Tabla 14. Especies seleccionadas para restaurar zona de Arbustal bajo.

Especies seleccionadas para áreas de Arbustal ZONA 2 actualmente disturbadas por factores antrópicos							
Disturbio	Macleani na Rupestri s	Pentacali a Corymbr osa	Pentaca lia Sp1	Bucque tia Pulchell a	Pentaca lia Pulchell a	Weinman nia Tomento sa	Hyperic um laricifoli um
Cultivos	X	x	X	x	x	x	X
Ganaderi a	X	x	X	x	x	x	X

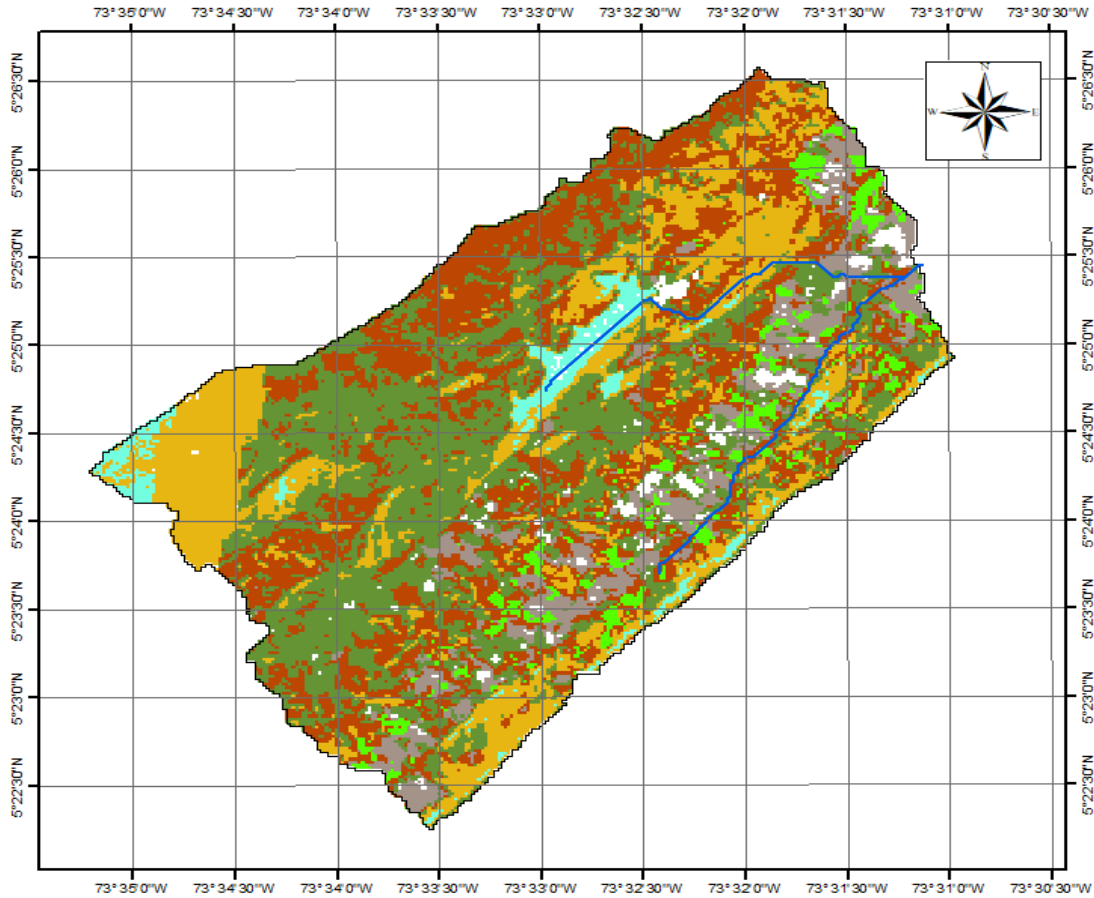
## 9 CONCLUSIONES


- Mediante el procesamiento de imágenes satelitales y un adecuado análisis de las coberturas vegetales por procesos de corrección y clasificación, se pudo estimar que coberturas de tipo herbáceo, arbustiva y de bosque han tenido una notable disminución a lo largo del tiempo, en un período de 34 años (1986 – 2020). Se pudo establecer que esta disminución de coberturas nativas está estrechamente relacionada con el aumento considerable de coberturas asociadas a actividades antrópicas como lo son los cultivos, importantes productos en la economía de los municipios de Ventaquemada y Samacá. La ganadería también ha causado fuertes impactos en la zona de estudio, ya que se asocia el notorio aumento de pastos y suelos desnudos con esta actividad.
- Para el plan de restauración ecológica, se escogieron aquellas zonas en donde al inicio del estudio se contaba con vegetación nativa y al finalizar el mismo se notaba un cambio de cobertura por alguna actividad relacionada con factores antrópicos. Se determinaron cuáles especies ayudarían a mejorar el ecosistema a través de un proceso de selección en el que primaron las especies propias del sector y paralelamente se consultaron planes de manejo ambiental ya ejecutados, para conocer el comportamiento de dichas plantas en labores de restauración de ecosistemas.
- A través de la caracterización de las coberturas vegetales por métodos de clasificación, se puede concluir que las coberturas vegetales que tuvieron un fuerte incremento en la zona de estudio fueron la de los cultivos con el 14 % equivalente a 697,25 ha y la presencia de pastos en el sector con un incremento del 9.14 %, cerca de 274 ha. Se evidencia, como las coberturas vegetales que sufrieron mayor afectación y deterioro fueron la vegetación de páramo y el arbustal bajo, con reducciones del 14.77 % (444,293 ha) y 7.29 % (219,218 ha) respectivamente.
- Del análisis multitemporal se puede concluir para el análisis de las coberturas vegetales, que las tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra representan una categoría baja a pesar de un considerable incremento en pérdida de cobertura en bosque, arbustal bajo y vegetación de páramo y un notable incremento de cultivos en la zona.
- El indicador de vegetación remanente indica el estado natural de las coberturas vegetales en la zona de estudio. En este proyecto demostró que durante los 34 años de estudio, disminuyó el 24,47 % en el índice de vegetación remanente (IVR), pasando de ser una vegetación de sostenibilidad alta en 1986 a vegetación de sostenibilidad media en 2020, con 85.46 % y 60.99 % respectivamente.

- Las tasas anuales de cambio demuestran que las coberturas vegetales de bosque mixto, arbustal bajo y vegetación de páramo han sufrido progresivamente la intervención del ser humano con fines socioeconómicos, sin medir la afectación a estos importantes ecosistemas. Esto puede conducir al planteamiento de un plan de manejo ambiental para el control y la restauración de las coberturas que han sufrido cambios significativos en la vegetación nativa de la zona de estudio.
- De la realización de este proyecto de investigación, se concluye que tradicionalmente las actividades económicas de producción han estado basadas en la explotación de recursos y adaptación de la naturaleza con fines antrópicos, sin medir el impacto ambiental y los efectos de transformación que sufre la naturaleza, por lo que se considera que desde diversas disciplinas se deben hacer más trabajos investigativos que se preocupen por indagar sobre el impacto que tiene el ser humano en la naturaleza y posibles metodologías o desarrollos técnicos y tecnológicos que contribuyan a la restauración y preservación del medio ambiente, mientras se garantiza el bienestar humano. Además de buscar apoyo por parte de herramientas jurídicas que deben hacerse cada vez más fuertes frente a la protección de los recursos naturales, para así, contribuir al desarrollo de actividades laborales de una forma más consciente frente al impacto ambiental que tienen.
- Se concluyó, que se cumplieron con los objetivos de la investigación, haciendo uso de los instrumentos de análisis de datos y finalmente, se elaboró el plan de acción de restauración de suelo, con el fin de no solamente identificar un problema en el lugar de estudio, sino proveer una solución a dicha problemática y crear un impacto desde los conocimientos adquiridos en la formación académica como ingenieros civiles.

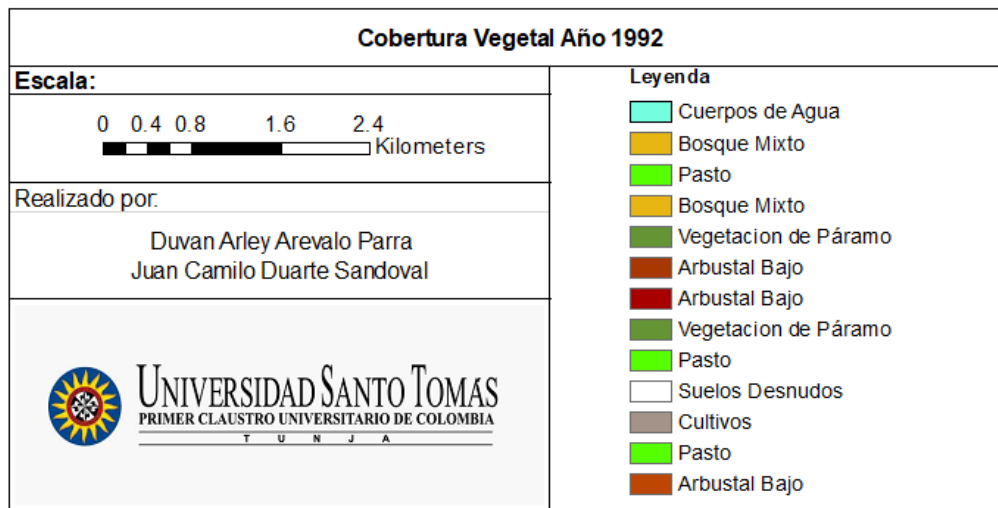
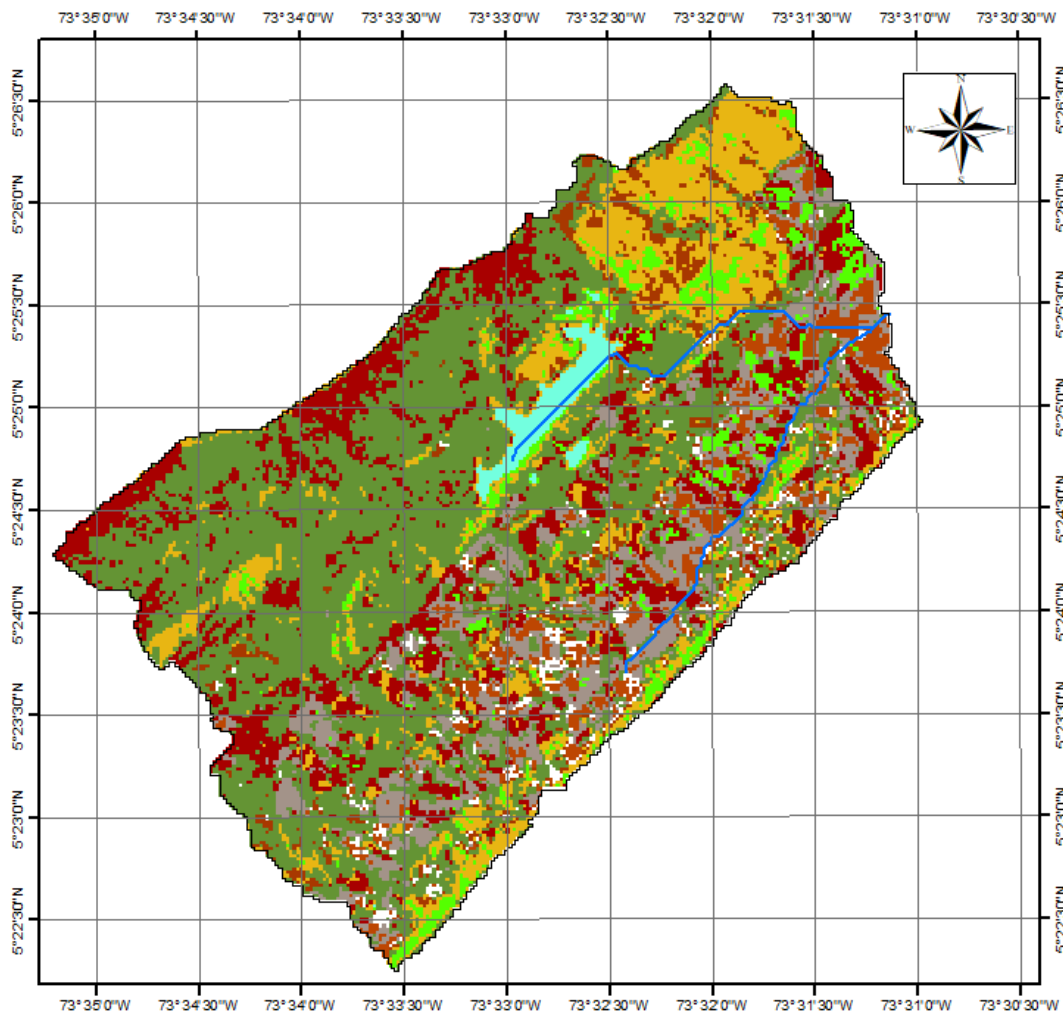
# 10 ANEXOS

## Anexo A. Mapa de la cobertura vegetal para el año 1986

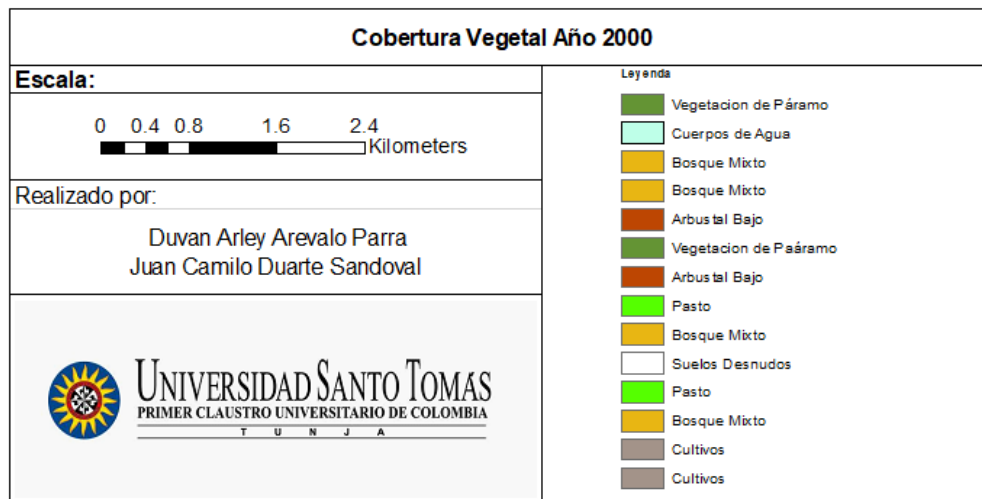
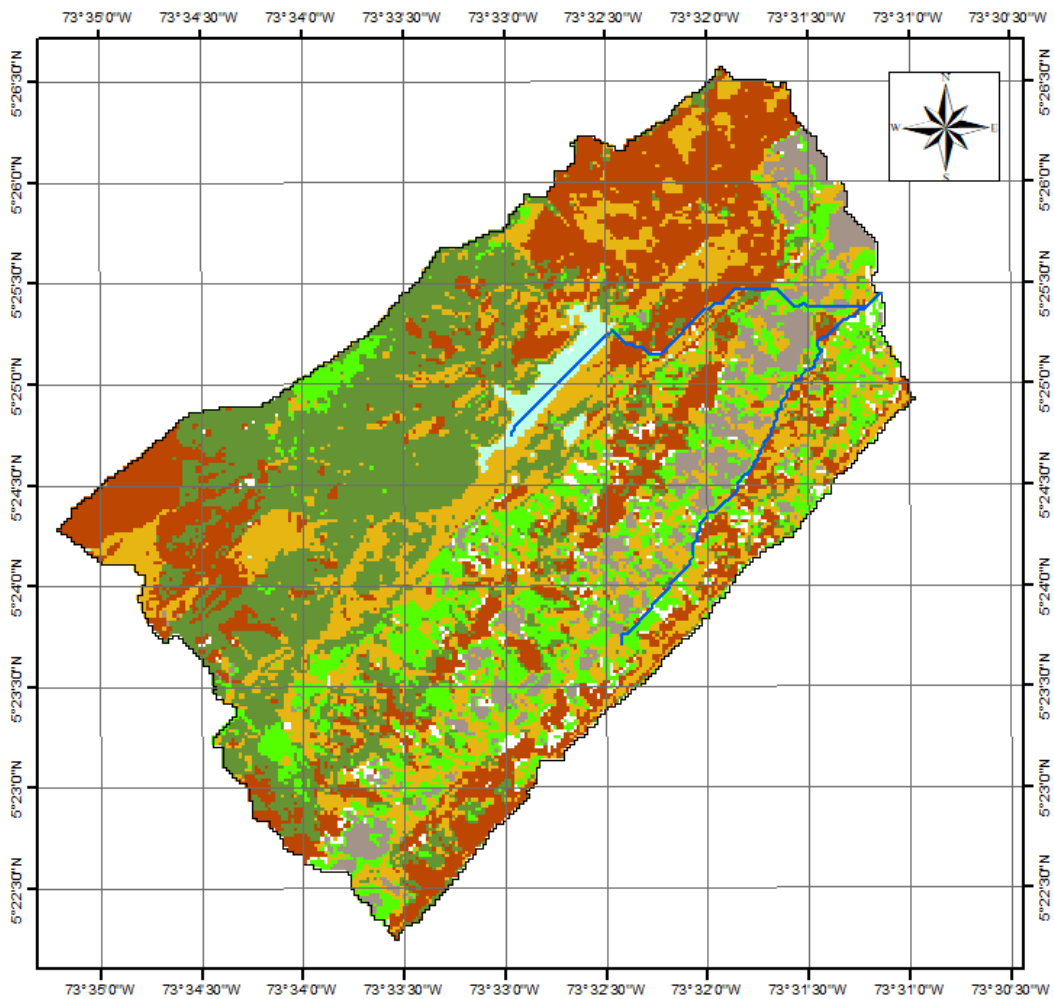


Cobertura Vegetal Año 1986	
<b>Escala:</b> 0 0.4 0.8 1.6 2.4 Kilometers	<b>Leyenda</b>
Realizado por: Duvan Arley Arevalo Parra Juan Camilo Duarte Sandoval	<b>Value</b> Cuerpos de Agua Cuerpos de Agua Bosque Mixto Páramo Bosque Mixto Arbustal Bajo Pasto Arbustal Bajo Paramo Cultivos Suelos Desnudos
 <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS</b> PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA T U N J A	

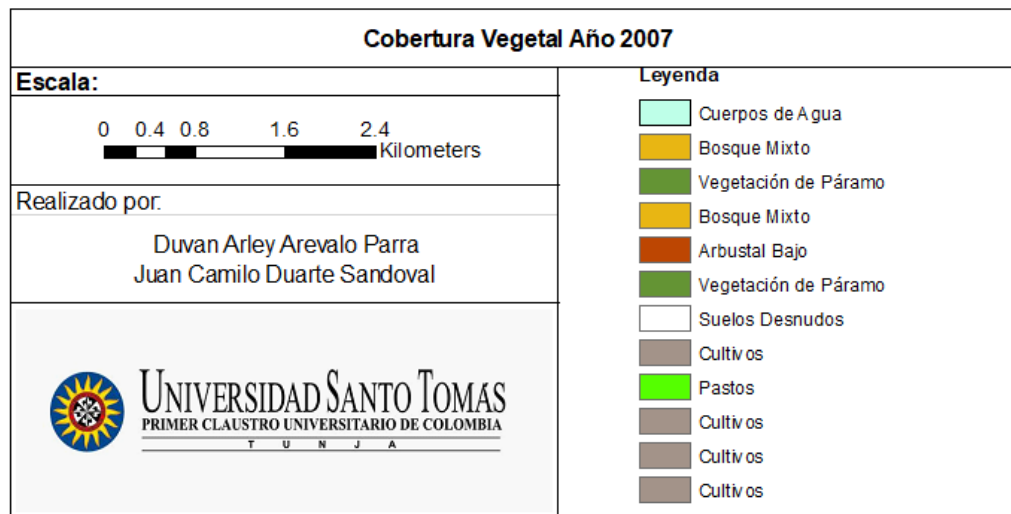
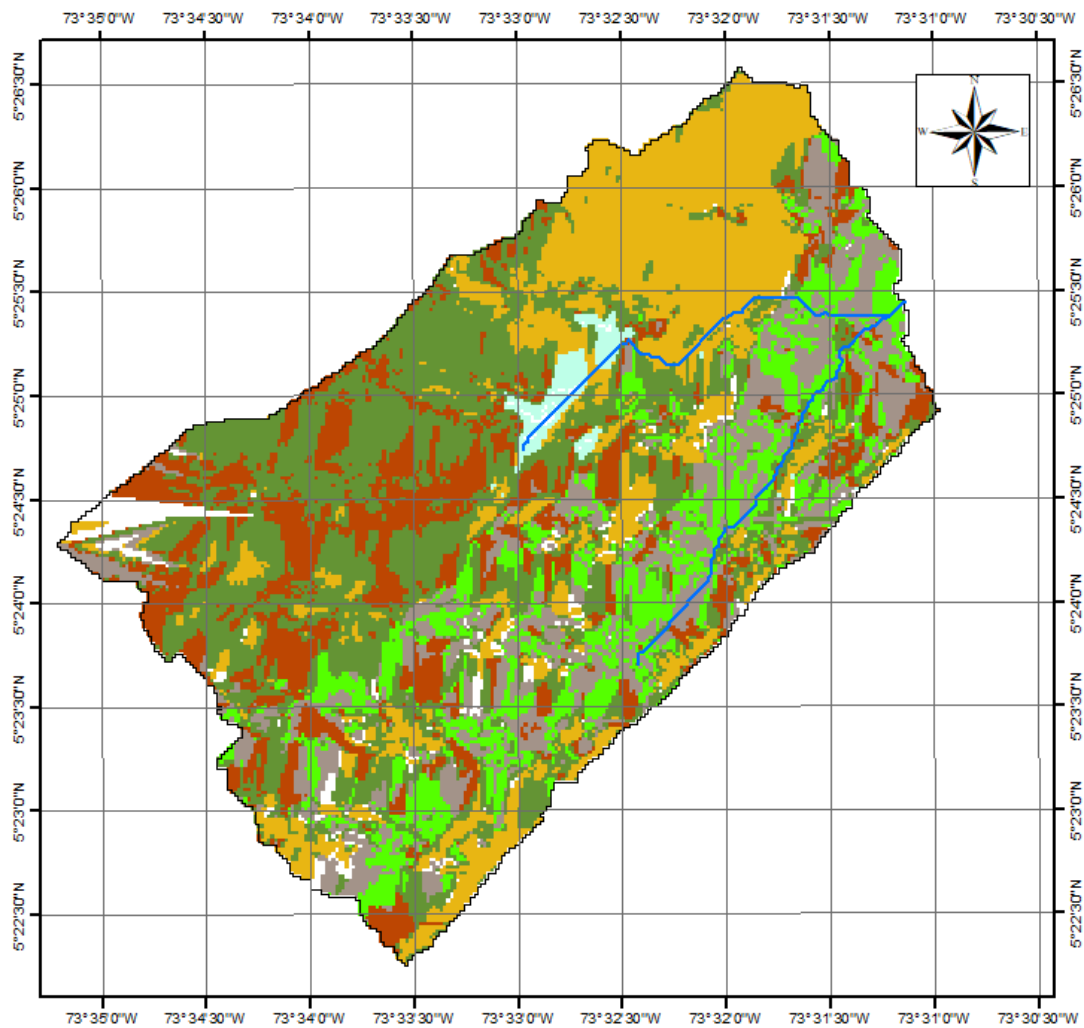
## Anexo B. Mapa de la cobertura vegetal para el año 1992



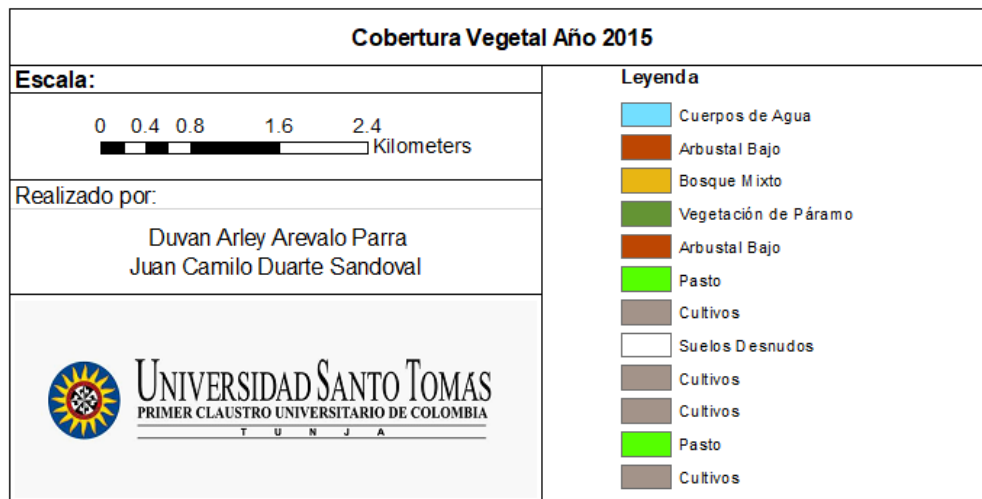
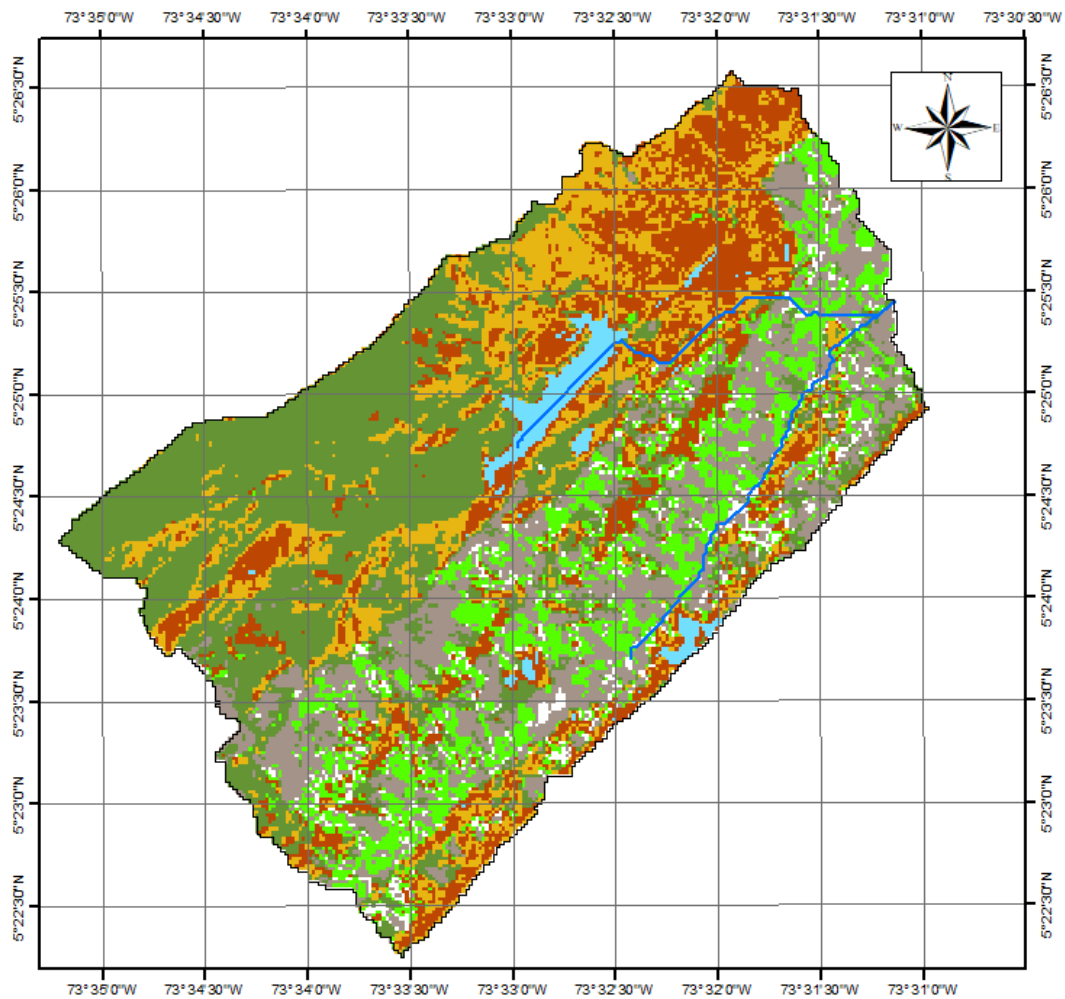
## Anexo C. Mapa de la cobertura vegetal para el año 2000



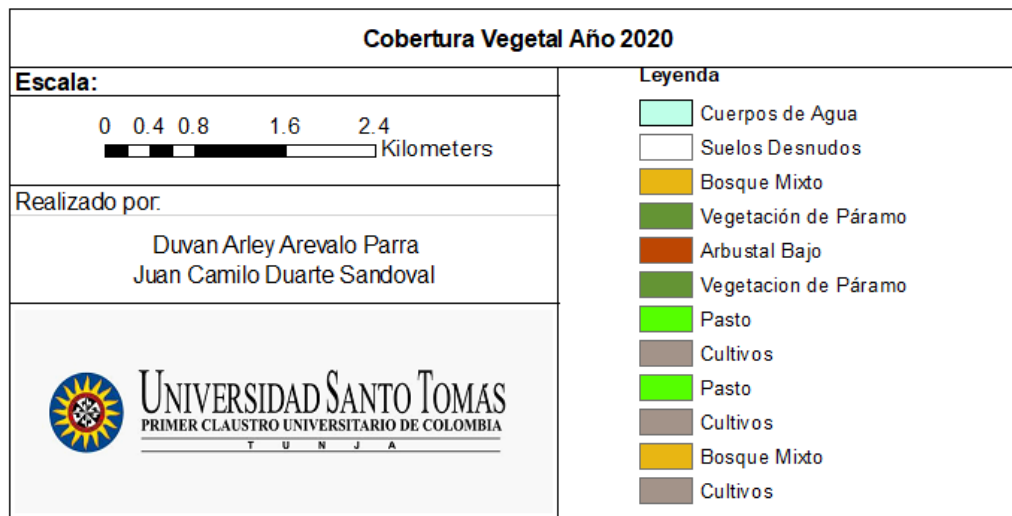
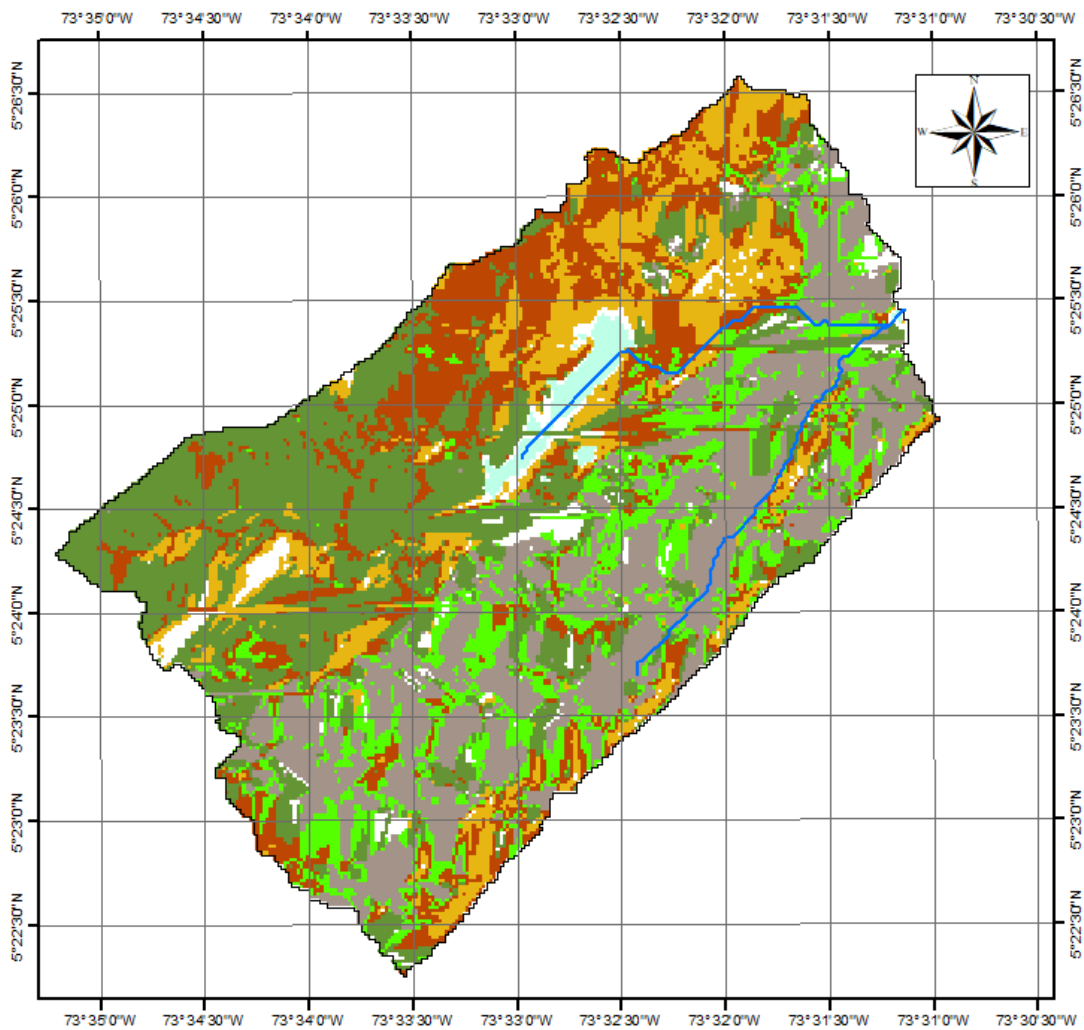
## Anexo D. Mapa de la cobertura vegetal para el año 2007



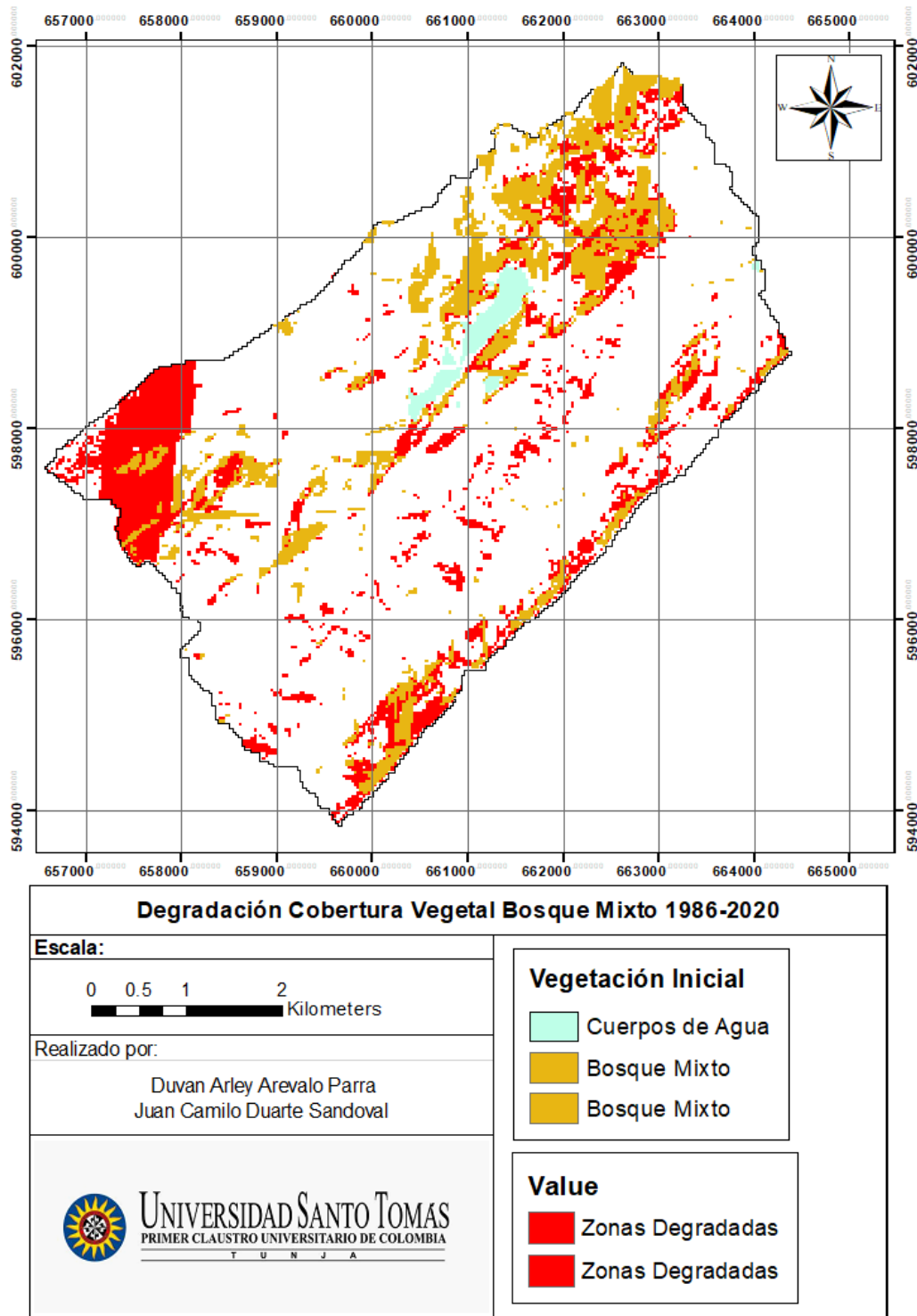
## Anexo E. Mapa de la cobertura vegetal para el año 2015



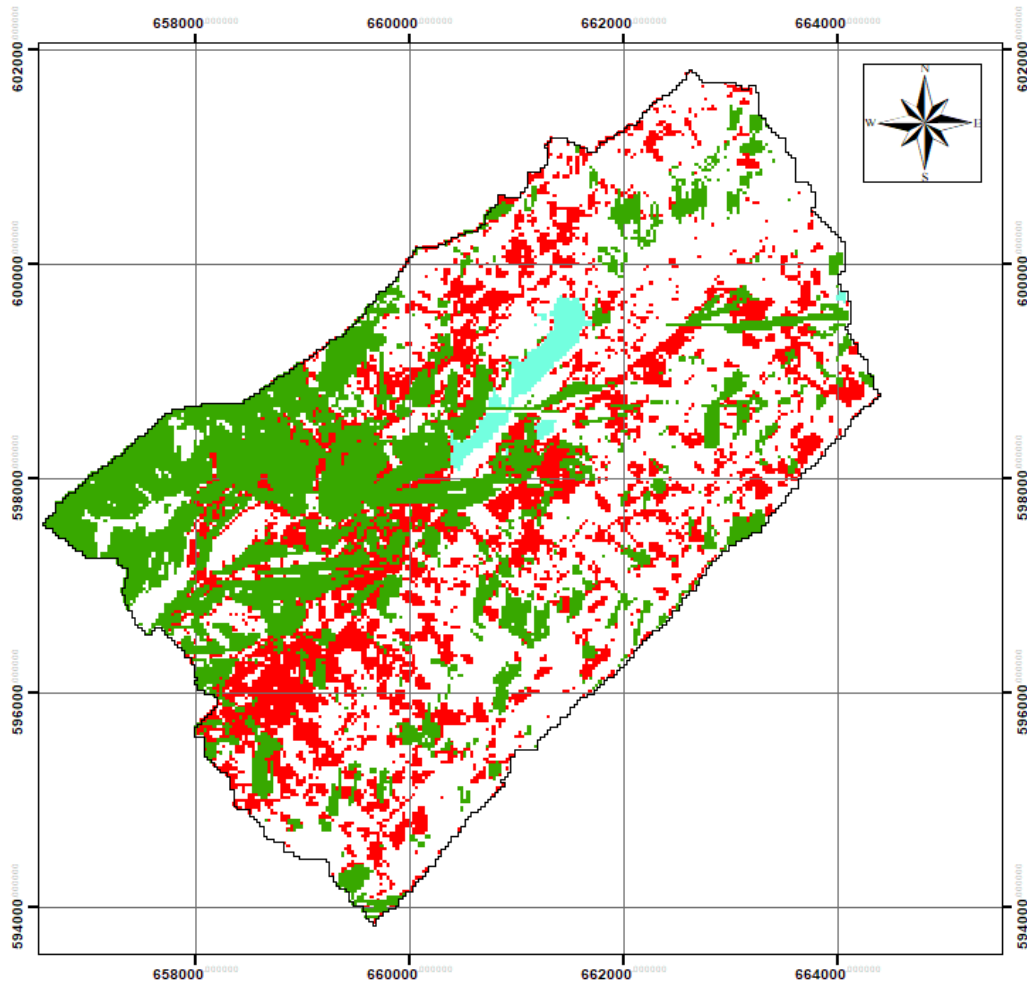
## Anexo F. Mapa de la cobertura vegetal para el año 2020




Anexo G. Cambio de cobertura a través del tiempo para Bosque Mixto

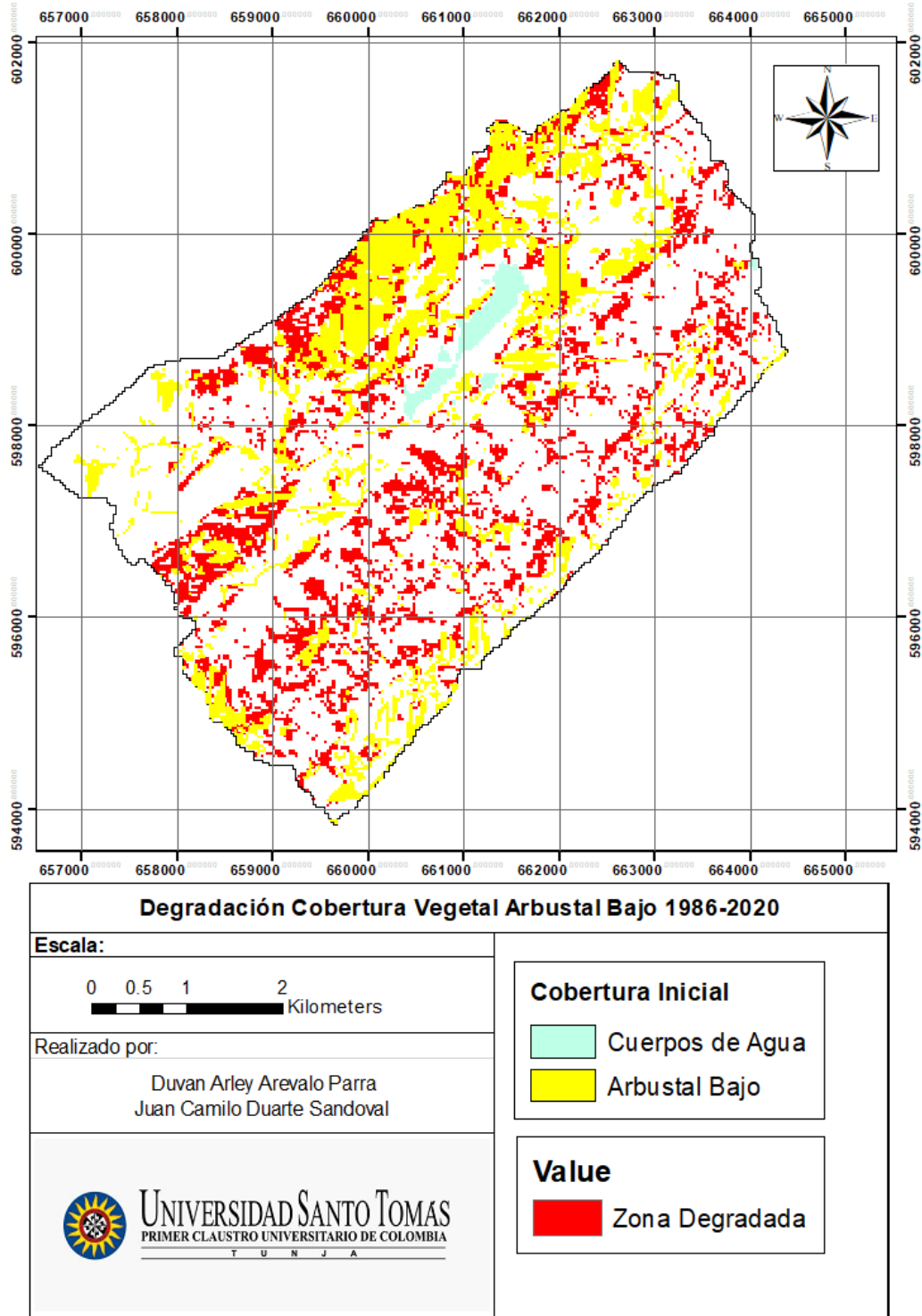


Anexo H. Cambio de cobertura a través del tiempo para Vegetación de páramo

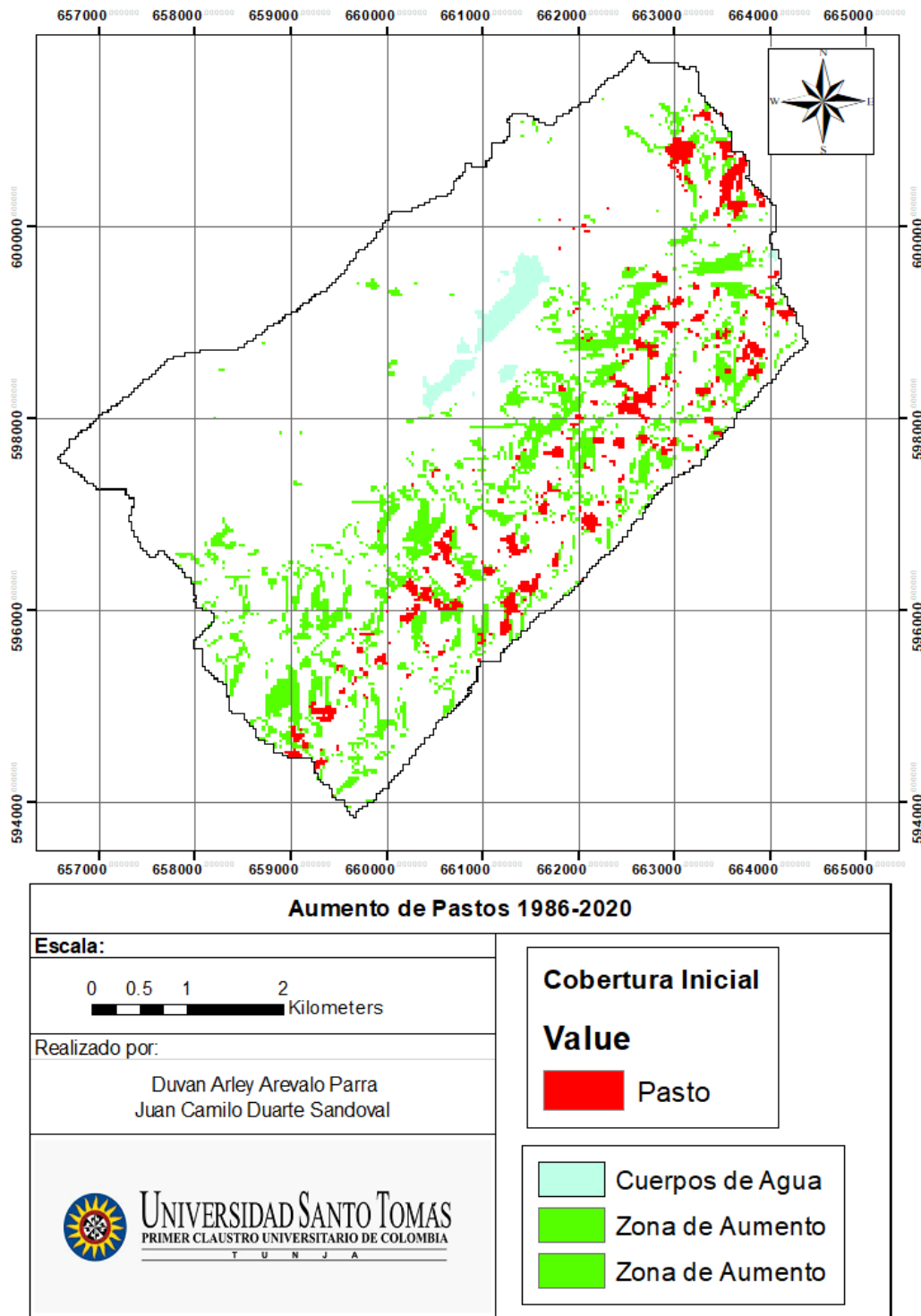


<b>Degradación Cobertura Vegetal de Páramo 1986-2020</b>	
<p><b>Escala:</b></p> <p style="text-align: center;">0 0.5 1 2 Kilometers</p> <hr/> <p>Realizado por:</p> <p style="text-align: center;">Duvan Arley Arevalo Parra Juan Camilo Duarte Sandoval</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p><b>Vegetación Inicial</b></p> <p><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: cyan; border: 1px solid black;"></span> Cuerpos de Agua</p> <p><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: green; border: 1px solid black;"></span> Vegetación de Páramo</p> <p><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: darkgreen; border: 1px solid black;"></span> Vegetacion de Páramo</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><b>Value</b></p> <p><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black;"></span> Zona Degradada</p> <p><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black;"></span> Zona Degradada</p> </div>
	

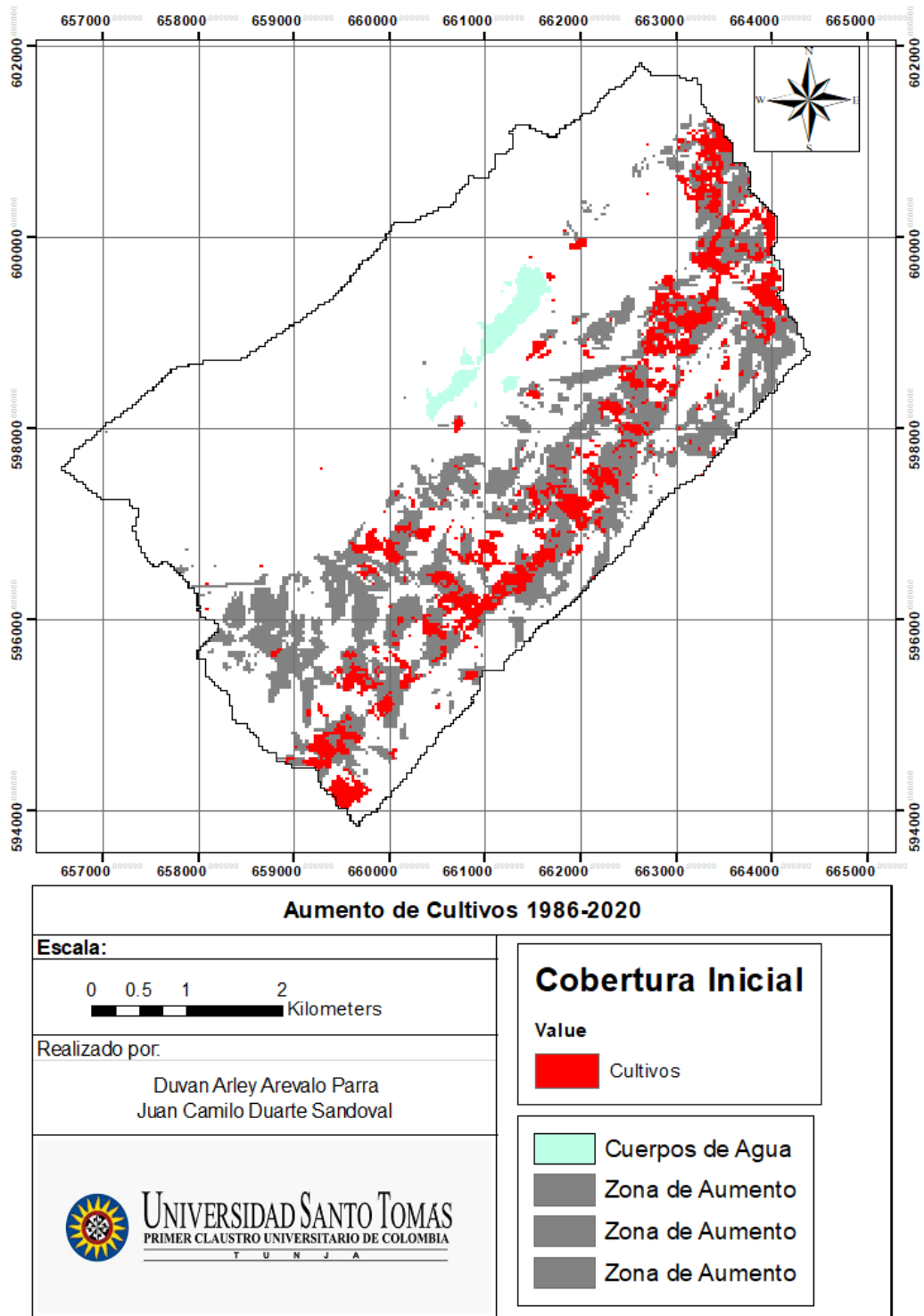
Anexo I. Cambio de cobertura a través del tiempo para Arbustal bajo



## Anexo J. Cambio de cobertura a través del tiempo para Pastos



## Anexo K. Cambio de cobertura a través del tiempo para Cultivos



## 11 BIBLIOGRAFÍA

Actividad Antrópica (2021). *Construmatica*.

[https://www.construmatica.com/construpedia/Actividad\\_Antrópica](https://www.construmatica.com/construpedia/Actividad_Antrópica)

Administración de Parques Nacionales. (2005). *Protocolo para el pre procesamiento de imágenes satelitales Landsat para aplicaciones de la Administración de Parques Nacionales*. Sistema de Información de Biodiversidad, 22. [https://sib.gob.ar/archivos/Protocolo\\_Landsat.pdf](https://sib.gob.ar/archivos/Protocolo_Landsat.pdf)

Aguilar, H., Mora, R., y Vargas, C. (2015). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes áster, rapideye, spot 2 y landstat 8 con el módulo flaash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53).

<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/6609>

Aguirre, N., Torres, J. y Velasco, P. (2014). *Guía para la restauración ecológica en los páramos de Antisana. Fondo para la protección del agua*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/07/Gu%C3%ADa-Metodol%C3%B3gica-restauracion-p%C3%A1ramos.pdf>.

Alonso, D. (2015). *6 opciones para descargar imágenes Landsat GRATIS*. MappingGIS.

<https://mappinggis.com/2015/05/como-descargar-imagenes-landsat/>

Ambrosio, G., González, J., y Arévalo, V. (2002). *Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal*. Universidad de Malaga.

<http://mapir.isa.uma.es/varevalo/drafts/ambrosio2002crg.pdf>

Andrade, D. (2016). *Análisis multitemporal de la cobertura de páramo en la producción de agua en la cuenca alta del río Apuela, Cantón Cotacachi, provincia de Imbabura* [Tesis de grado].

Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6910>

Alzate, G., y Sánchez, P. (2018). *Análisis multitemporal por teledetección del cambio de coberturas en las veredas Pantanillo y las Palmas del municipio de Envigado en el periodo comprendido entre los años 1997 y 2016* [Tesis de maestría].

<http://hdl.handle.net/10839/2134>

Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). <https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>.

Ariza, C. (2018). *Sustitución Y Reversión Productiva En La Delimitación Del Páramo Cruz Verde – Sumapaz* [Tesis de especialización]. Universidad Militar Nueva Granada.

Bandas espectrales. (2021). *Geomatica*.

<https://sites.google.com/site/terminosdelageomatica/terminos/bandas-espectrales>

Camacho, J. et al. (2015). Cambios de cobertura /uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montañaaverage. *Maderas y Bosques*, 21(1), 93–112.

Camacho, R. et al. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: Estudio de caso en Progreso Hidalgo, estado de México. *Maderas y Bosques*, 23(3), 39–60.

<https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331516>

Congreso de Colombia. (2018). *Ley 1930: LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS PÁRAMOS EN COLOMBIA*. Congreso de Colombia. [http://www.andi.com.co/Uploads/Ley-2018-N0001930\\_20180727.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Ley-2018-N0001930_20180727.pdf)

Corpoboyacá. (2016). *Plan de acción 2016-2019*. Corpoboyacá.

<https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2020/11/Plan-de-Acci%C3%B3n-2016-2019-Corpoboyaca-estrategia-de-sostenib.pdf>

CORPOCHIVOR (2018). *Plan de Manejo Ambiental del Distrito Regional de Manejo Integrado*

(DRMI) *Páramo Rabanal. Componente Diagnóstico*. COPOCHIVOR.

<http://fauna.corpochivor.gov.co/wp-content/uploads/2016/04/PMA-rabanal-Componente-Diag%C3%B3stico.pdf>

*Correcciones a las imágenes de satélites*. (2003). Apuntes de La Asignatura Teledetección En Geografía, Universidad de Murcia 79–88.

<https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema07.pdf>.

Daza, M., Hernández, F. y Triana, F. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 67(1), 7189–7200.

<http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v67n1/v67n1a06.pdf>

De la Cruz, J. y Muñoz, G. (2016). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y cambio de uso de suelo del área de influencia del programa de reforestación de la federación nacional de cafeteros en el municipio de Popayán, Cauca* [Tesis de especialización]. Universidad de Manizales. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/2807>

Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente. (25 de agosto de 2017) *Degradación del suelo*. Euskadi.eus. <https://www.euskadi.eus/informacion/degradacion-del-suelo/web01-a2inglur/es/>

Díaz, M. et al. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64–75.

[https://www.researchgate.net/publication/268374197\\_Paramos\\_Hidrosistemas\\_Sensibles](https://www.researchgate.net/publication/268374197_Paramos_Hidrosistemas_Sensibles)

Elizondo, J. y Palafox, L. (2005). *Fundamentos de Procesamiento de Imágenes*. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO.

Frailejón. (2021). *Diccionario de la lengua española (RAE)* <https://dle.rae.es/frailejón>.

Franzpc. (10 de mayo de 2012). *Clasificación supervisada y no supervisada en ArcGIS* El blog de

- franz. <https://acolita.com/clasificacion-supervisada-no-supervisada-en-arcgis/>
- Garavito, L. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *Ingeniare*, 19, 127–136.  
<http://www.unilibrebaq.edu.co/ojsinvestigacion/index.php/ingeniare/article/view/704>
- Georreferenciación y sistemas de coordenadas (2014). *ArcGIS Resource Center*.  
<https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000s000000.htm>
- Glosario ambiental: ¿Deforestación o degradación? ¿Reforestación o restauración? Resolvamos dudas (28 de febrero de 2018). *WWF*. <https://www.wwf.org.co/?uNewsID=323725>
- Hernández, L. y Salamanca, J. (2019). *Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y su influencia en la generación de caudales pico de la cuenca Sardinata, del departamento de Norte de Santander - Colombia* [Tesis de especialización]. Universidad Católica de Colombia.  
[https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23391/1/Proyecto\\_v2\\_EDITADO.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23391/1/Proyecto_v2_EDITADO.pdf)
- Hofstede, R., Segarra, P. y Mena, P. (2003). *Los Paramos del Mundo*.  
[https://www.portalces.org/sites/default/files/references/038\\_Hofstede et al. \(eds\).2003.Los Paramos del Mundo.pdf](https://www.portalces.org/sites/default/files/references/038_Hofstede%20et%20al.%20(eds).2003.Los%20Paramos%20del%20Mundo.pdf)
- Ibañez, N. y Damman, G. (2013). Cambios de la cobertura de los suelos para la elaboración de escenarios territoriales en la región Apurímac. *Revista Zonas Áridas* 15(1).  
<http://dx.doi.org/10.21704/za.v15i1.108>
- IGAC. (2005). *Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra*.
- Instituto Geográfico Nacional. (2021) *¿Qué es la Teledetección?* IGN. <http://www.ign.es>
- International Union for conservation of nature. (2018). *Cuenca Hidrográfica*.  
[https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/cuenca\\_hidrografica.pdf](https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/cuenca_hidrografica.pdf)

La cobertura vegetal en la cuenca del canal de Panamá. (2021). *Geoinstitutos*.

[http://www.geoinstitutos.com/art\\_03\\_cober2.asp](http://www.geoinstitutos.com/art_03_cober2.asp)

Lira, A., y Guevara, A. (2018). Irradiancia y radiancia. *CONACyT-SENER*.

Minambiente. (9 de octubre de 2018). *Páramos*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

<https://www.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos/paramos>

Minambiente. (2014). *POMCA de la cuenca del río Guali*. Minambiente.

<https://www.cortolima.gov.co/cuenca-guali>

Minambiente. (2014). *Guía técnica para la Formulación de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Vol. 1).

[http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/cuencas-hidrograficas/GUIA\\_DE\\_POMCAS.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/cuencas-hidrograficas/GUIA_DE_POMCAS.pdf)

Minambiente. (2010). *Decreto 2372. Diario Oficial No. 47.757, 23*.

[http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec\\_2372\\_2010.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_2372_2010.pdf)

Minambiente. (2003). *Resolución Número 0839 del 1 de agosto de 2003. 0839, 10*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

[https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Paramos/res\\_0839\\_010803.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Paramos/res_0839_010803.pdf)

Ministerio de Ambiente. (2002). Programa para el manejo sostenible y restauración de ecosistemas de alta montaña colombiana: Páramos. *The Journal of Rural Health*, 11(3), 177–184.

<https://doi.org/10.1111/j.1748-0361.1995.tb00413.x>

Minambiente. (2002). *Resolución 0769 de 5 de agosto de 2002. 0769, 6*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

- [http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Paramos/res\\_0769\\_050802.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Paramos/res_0769_050802.pdf)
- Minambiente. (1993). *Ley 99 De 1993. Diario Oficial, 41146, 44*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Minería amenaza páramos. (2011). *EL ESPECTADOR*.  
<https://www.elespectador.com/noticias/politica/mineria-amenaza-paramos/>
- Ministerio de hacienda y credito público. (2010). *Ley 1382 Del 9 De Febrero De 2010. Ley, 5, 15*.  
[https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec\\_2715\\_2010.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_2715_2010.pdf)
- Morales, M. et al (2007). Atlas de páramos de Colombia. *Cytopathology*, 16(1).  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2303.2004.00206.x>
- Nuestro municipio. (8 de septiembre de 2018). *Alcaldía Municipal de Samacá*. <http://www.samacaboyaca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Ordoñez, J. (2011). *Balance Hídrico Superficial*. Sociedad Geográfica de Lima, 44.  
[https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/balance\\_hidrico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf)
- Parra Ortega, S. (2013). *Caracterización de coberturas vegetales, Páramo de Rabanal Cundinamarca-Boyacá*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 1–37. [file:///C:/Users/USUARIO/Desktop/CARACTERIZACION DE COBERTURAS VEGETALES.pdf](file:///C:/Users/USUARIO/Desktop/CARACTERIZACION%20DE%20COBERTURAS%20VEGETALES.pdf)
- Pérez, C. y Muñoz, A. (2002). *Teledetección: Nociones y aplicaciones*.  
<https://mundocartogeo.files.wordpress.com/2015/03/teledeteccion-nocionesaplicaciones-2006publico.pdf>
- Perez, J. y Gardey, A. (2018). *Definición de hidráulica*. Definición.de

- <https://definicion.de/hidraulica/>
- Precipitación. (2021). *GeoEnciclopedia*. <https://www.geoenciclopedia.com/precipitacion/>
- ¿Qué es la Resolución Espacial En Una Imágen Satelital? (12 de agosto de 2020). *Earth Observatory System*. <https://eos.com/es/blog/resolucion-espacial/>
- ¿Qué son las imágenes satelitales? (6 de abril de 2018). *Universidad de Ciencias y Humanidades*. <http://blog.uch.edu.pe/ingenieria-electronica-con-mencion-en-telecomunicaciones/que-son-las-imagenes-satelitales/>.
- Quintero, F. (2015). *Análisis hídrico del páramo de pisba por variación multitemporal de la cobertura vegetal* [Tesis de pregrado]. Universidad Santo Tomás de Colombia.
- Radiometría*. (2021). EcuRed. <https://www.ecured.cu/Radiometría>
- Raffino, M. (28 de agosto de 2020). *Geomorfología*. Concepto.de.
- República de Colombia. (2011). “*Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014*.” Diario Oficial de La República de Colombia, N° 48.102, 16 de junio, 1–198. [https://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/docs/ddr/CompiladoNormativo\\_Parte3.pdf](https://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/docs/ddr/CompiladoNormativo_Parte3.pdf)
- Restrepo, J., Suárez, C., y Álvarez, M. (2008). *Plan integral de manejo del Distrito de Manejo Integrado de los recursos naturales “Páramo de Berlín*.” Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga., 103.
- Rojas, N., et al (2019). Deforestación en la Amazonía peruana: índices de cambios de cobertura y uso del suelo basado en SIG. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2538a>
- Ruales, M. y Dávila, N. (2019). *Efectos del cambio del suelo sobre el servicio ecosistémico hídrico de provisión en la microcuenca del río Itambi* [Tesis de grado]. Universidad Técnica del

- Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9253>.
- Santaella, J. (2016). *Modelos Digitales de Elevación (MDE)*. Instituto Nacional de Estadística y Geográfica, 1–14.
- Sarmiento, C. et al (2013). *Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia : actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.  
<http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/31406#.XR0GZNq7t58.mendeley>
- Schmidt, C. (2018). *La clasificación del manto terrestre a partir de imágenes satelitales : Cómo mejorar una clasificación supervisada Estructura de la capacitación*. NASA.  
[https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/week2\\_final\\_span.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/week2_final_span.pdf)
- Secretaria Administrativa y de Control Interno. (2020). *Plan de Desarrollo Municipal 2020 - 2023 "Por una población Ventaquemense mejor."*  
<https://www.contratos.gov.co/consultas/detalleProceso.do?numConstancia=20-12-10679663>
- Sensor remoto. (2021). EcuRed. [https://www.ecured.cu/Sensor\\_remoto](https://www.ecured.cu/Sensor_remoto)  
<https://concepto.de/geomorfologia/>
- Tapia, C. (2009). *Plan Participativo de Manejo y Conservación del Macizo del Páramo de Rabanal*. Instituto Humboldt. <http://www.humboldt.org.co/es/i2d/item/352-plan-participativo-de-manejo-y-conservacion-del-macizo-del-paramo-de-rabanal>
- Universidad Santo Tomás de Colombia. (30 de abril de 2019). *Plan de Estudio de pregrado en Ingeniería Civil*. <https://facultadingenieriacivil.usta.edu.co/images/plan-estudio/plan-estudio.pdf>
- Valverde, E. (2018). *Modelación hidrológica para cuantificar la producción de agua y sedimento actual y futuro a partir de cambios de cobertura forestal, sector Prusia, Parque Nacional*

*Volcán Irazú*. [Tesis de licenciatura]. Tecnológico de Costa Rica.

<http://hdl.handle.net/2238/10335>

Vargas, O., et al (2012). *Guías técnicas para la restauración ecológica de los ecosistemas de Colombia*. Grupo de restauración ecológica.

[https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/plan\\_nacional\\_restauracion/Anexo\\_8\\_Guias\\_Tecnicas\\_Restauracion\\_Ecologica\\_2.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/plan_nacional_restauracion/Anexo_8_Guias_Tecnicas_Restauracion_Ecologica_2.pdf)

Zorogastúa, P., Quiroz, R., y Garatuza, J. (2011). Evaluación De Cambios En La Cobertura Y Uso De La Tierra Con Imágenes De Satélite En Piura - Perú. *Ecología Aplicada*, 10(1–2), 13.

<https://doi.org/10.21704/rea.v10i1-2.409>.