



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

**VRIN** | VICERRECTORADO  
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

APLICACIÓN DEL ÍNDICE NORMALIZADO DE ÁREA QUEMADA (NBR) Y SISTEMAS  
DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA ESTIMAR LA SEVERIDAD DE LOS  
INCENDIOS FORESTALES EN EL DEPARTAMENTO DE CUSCO

Línea de investigación:  
Procesamiento digital de imágenes y señales

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

**Autora:**

Gonzáles Vásquez, Antonella Margott

**Asesora:**

Rojas León, Gladys  
(ORCID: 0000-0003-2961-9643)

**Jurado:**

García Vilca, Godilia Teresa  
Guillen León, Rogelia  
Loroña Calderón, Frank Edgar

Lima – Perú

2022

**Dedicatoria**

La presente investigación está dedicada especialmente a mis padres, Jenny y Alberto, por su apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida y por haberme formado como la persona que soy en estos momentos. A mis hermanos; Christian, Lucia y Tamara, por ser mi soporte en todo momento; a mi compañero de vida, Jaison, por apoyarme en todo lo que hago; y a mi familia en general.

### **Agradecimiento**

Agradecer en primer lugar a Dios, por bendecirme y guiarme en este proceso.

A la Universidad Nacional Federico Villarreal, mi alma máter, por brindarme los conocimientos y experiencias durante mi carrera profesional.

A mi profesora de pre-grado y asesora de tesis Mg. Gladys Rojas León, por sus enseñanzas, su tiempo, dedicación y apoyo en esta investigación.

## Índice

Dedicatoria.....	II
Agradecimiento.....	III
Resumen.....	XII
Abstract.....	XIII
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.1. Descripción y formulación del problema.....	16
1.1.1. Descripción del problema .....	16
1.1.2. Formulación del problema .....	18
1.2. Antecedentes .....	18
1.2.1. Antecedentes internacionales .....	18
1.2.2. Antecedentes nacionales .....	21
1.3. Objetivos .....	24
1.3.1. Objetivo general.....	24
1.3.2. Objetivos específicos .....	24
1.4. Justificación.....	24
1.5. Hipótesis general.....	25
<b>II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>26</b>
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	26
2.1.1. Incendios forestales.....	26
2.1.2. Teledetección .....	31
2.1.3. Satélites y sensores.....	36

2.1.4. Criterios de teledetección en incendios forestales .....	39
2.1.5. Índices espectrales.....	40
2.1.6. Plataforma Google Earth Engine .....	43
2.1.7. Sistema de Información Geográfica (SIG).....	44
2.2. Base Legal.....	45
III. MÉTODO.....	49
3.1. Tipo de investigación .....	49
3.2. Ámbito temporal y espacial .....	49
3.2.1. Ámbito temporal .....	49
3.2.2. Ámbito espacial.....	49
3.3. Variables .....	49
3.4. Población y muestra .....	52
3.4.1. Población.....	52
3.4.2. Muestra.....	52
3.5. Instrumentos.....	52
3.5.1. Material de escritorio .....	52
3.5.2. Material cartográfico.....	52
3.5.3. Software .....	53
3.6. Procedimientos.....	53
3.6.1. Etapa de recopilación de información.....	53
3.6.2. Etapa de sistematización de información.....	55

3.6.3. Etapa final .....	56
3.7. Análisis de datos .....	56
3.7.1. Análisis de las variables físicas y biológicas del departamento de Cusco.....	56
3.7.2. Análisis de la distribución espacial y temporal de los incendios forestales.....	56
3.7.3. Análisis del Índice Normalizado de Área Quemada (NBR) .....	57
IV. RESULTADOS.....	59
4.1. Ubicación del área de estudio .....	59
4.1.1. Ubicación geográfica .....	59
4.1.2. Ubicación política .....	59
4.1.3. Accesibilidad.....	61
4.2. Diagnóstico de variables físicas y biológicas del departamento de Cusco .....	62
4.2.1. Clima.....	62
4.2.2. Hidrografía .....	65
4.2.3. Geología .....	67
4.2.4. Geomorfología .....	68
4.2.5. Suelos .....	72
4.2.6. Capacidad de uso mayor (CUM).....	75
4.2.7. Cobertura vegetal .....	79
4.2.8. Ecosistemas .....	82
4.3. Distribución espacial y temporal de los incendios forestales.....	85
4.3.1. Distribución a nivel nacional .....	85

4.3.2. Distribución a nivel del departamento de Cusco .....	88
4.3.3. Distribución a nivel de la provincia de Espinar .....	90
4.4. Mapeo de Severidad de incendios forestales con el índice NBR.....	91
4.4.1. Selección del Área de estudio .....	91
4.4.2. Marco de Tiempo .....	92
4.4.3. Selección del satélite .....	92
4.4.4. Cálculo del Índice Normalizado de área quemada (NBR).....	94
4.4.5. Cálculo de la severidad de incendios (dNBR) .....	95
4.5. Evaluación de severidad de los incendios forestales.....	96
4.5.1. Reclasificación de los niveles de severidad .....	97
4.5.2. Cortar el área del incendio .....	98
4.5.3. Conversión de Ráster a Shapefile .....	99
4.5.4. Edición del área de incendio (polígono) .....	100
4.5.5. Niveles de severidad de los incendios forestales .....	101
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	104
VI. CONCLUSIONES .....	106
VII. RECOMENDACIONES .....	109
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
II. ANEXOS .....	121
Anexo A Matriz de Consistencia .....	121
Anexo B Características del Dataset de las imágenes satelitales usadas .....	123

Anexo C Script de Mapeo de severidad de incendios forestales ..... 124

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Causas de los Incendios forestales en el Perú</i> .....	27
<b>Tabla 2</b> <i>Consecuencias de los Incendios forestales en el Perú</i> .....	28
<b>Tabla 3</b> <i>Distribución de las bandas en OLI y TIRS</i> .....	38
<b>Tabla 4</b> <i>Variables de estudio</i> .....	50
<b>Tabla 5</b> <i>Unidades geológicas</i> .....	67
<b>Tabla 6</b> <i>Unidades geomorfológicas</i> .....	69
<b>Tabla 7</b> <i>Clasificación de suelos</i> .....	72
<b>Tabla 8</b> <i>Capacidad de uso mayor</i> .....	77
<b>Tabla 9</b> <i>Unidades de cobertura vegetal</i> .....	79
<b>Tabla 10</b> <i>Tipos de ecosistemas identificados</i> .....	82
<b>Tabla 11</b> <i>Ocurrencia de incendios forestales en el Perú (2000 – 2021)</i> .....	85
<b>Tabla 12</b> <i>Ocurrencia de incendios forestales en el departamento de Cusco (2000 – 2021)</i> ..	89
<b>Tabla 13</b> <i>Ocurrencia de incendios forestales en la Provincia de Espinar</i> .....	90
<b>Tabla 14</b> <i>Evaluación de la severidad del gran incendio en Coporaque</i> .....	101

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> <i>Plataforma GEOSERVIDOR</i> .....	29
<b>Figura 2</b> <i>Plataforma GEOSERFOR</i> .....	30
<b>Figura 3</b> <i>Componentes de un sistema de teledetección</i> .....	31
<b>Figura 4</b> <i>Espectro electromagnético</i> .....	33
<b>Figura 5</b> <i>Firmas espectrales de algunas superficies</i> .....	35
<b>Figura 6</b> <i>Ancho de banda - Sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7</i> .....	37
<b>Figura 7</b> <i>Promedio de la Respuesta Espectral Relativa en LDCM</i> .....	39
<b>Figura 8</b> <i>Incendio forestal en el distrito de Ocoruro, Espinar, Cusco</i> .....	40
<b>Figura 9</b> <i>Firmas espectrales de áreas quemadas vs vegetación saludable</i> .....	42
<b>Figura 10</b> <i>Plataforma Google Earth Engine</i> .....	43
<b>Figura 11</b> <i>Esquema explicativo – Severidad de incendios</i> .....	57
<b>Figura 12</b> <i>Mapa de ubicación del departamento de Cusco</i> .....	60
<b>Figura 13</b> <i>Estado de la red vial, Cusco</i> .....	61
<b>Figura 14</b> <i>Mapa de accesibilidad del departamento de Cusco</i> .....	63
<b>Figura 15</b> <i>Mapa de Climas del departamento de Cusco</i> .....	64
<b>Figura 16</b> <i>Mapa Hidrográfico del departamento de Cusco</i> .....	66
<b>Figura 17</b> <i>Mapa de geología del departamento de Cusco</i> .....	70
<b>Figura 18</b> <i>Mapa de geomorfología del departamento de Cusco</i> .....	71
<b>Figura 19</b> <i>Mapa de suelos del departamento de Cusco</i> .....	74
<b>Figura 20</b> <i>Mapa de Capacidad de uso mayor del departamento de Cusco</i> .....	78
<b>Figura 21</b> <i>Mapa de Cobertura Vegetal del departamento de Cusco</i> .....	81
<b>Figura 22</b> <i>Mapa de Ecosistemas del departamento de Cusco</i> .....	84
<b>Figura 23</b> <i>Número de Incendios Forestales por departamento (2000 – 2021)</i> .....	86
<b>Figura 24</b> <i>Incendios forestales registrados por año en el Perú</i> .....	87

<b>Figura 25</b> <i>Tendencia mensual de incendios forestales en el Perú (2000 – 2021)</i> .....	88
<b>Figura 26</b> <i>Número de Incendios Forestales en las provincias de Cusco (2000 – 2021)</i> .....	89
<b>Figura 27</b> <i>Número de Incendios Forestales en los distritos de Espinar (2000 – 2021)</i> .....	90
<b>Figura 28</b> <i>Selección del área de estudio por shapefile (distrito de Coporaque)</i> .....	91
<b>Figura 29</b> <i>Imagen previa al incendio forestal con máscara de nubes</i> .....	93
<b>Figura 30</b> <i>Imagen posterior al incendio forestal con máscara de nubes</i> .....	93
<b>Figura 31</b> <i>Resultado del cálculo de NBR previa al incendio</i> .....	94
<b>Figura 32</b> <i>Resultado del cálculo de NBR posterior al incendio</i> .....	94
<b>Figura 33</b> <i>Resultado del cálculo de severidad de incendios - dNBR a grises</i> .....	95
<b>Figura 34</b> <i>Resultado del cálculo de severidad de incendios - dNBR a color</i> .....	96
<b>Figura 35</b> <i>Niveles de severidad de incendios y codificación por colores</i> .....	96
<b>Figura 36</b> <i>Resultado de la Reclasificación</i> .....	97
<b>Figura 37</b> <i>Extract by Mask</i> .....	98
<b>Figura 38</b> <i>Resultado del geoproceso</i> .....	98
<b>Figura 39</b> <i>Conversión de ráster a polígono</i> .....	99
<b>Figura 40</b> <i>Resultado de la conversión y simbología por colores</i> .....	99
<b>Figura 41</b> <i>Edición de polígonos</i> .....	100
<b>Figura 42</b> <i>Resultado de la edición de polígonos</i> .....	100
<b>Figura 43</b> <i>Áreas quemadas respecto a la severidad del incendio</i> .....	102
<b>Figura 44</b> <i>Mapa de severidad de un gran incendio ocurrido en Coporaque, año 2016</i> .....	103

## Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo principal aplicar el índice Normalizado de área quemada (NBR) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar la severidad de los incendios forestales en el departamento Cusco. El método fue tipo cuantitativo, descriptivo y transversal. La metodología utilizada fue la diferencia del índice espectral NBR (dNBR) con imágenes de reflectancia del satélite Landsat 8 (pre-incendio y post-incendio); realizadas mediante un script en la Plataforma de Google Earth Engine (GEE) y analizadas con el software ArcGIS Pro, para un gran incendio ocurrido el año 2016 en el distrito de Coporaque, provincia de Espinar, Cusco. Los principales resultados fueron los niveles de severidad del gran incendio, con un total de área evaluada de 1,945.14 Ha y área quemada de 1,836.89 Ha. La cicatriz del incendio en su mayoría presentó zonas quemadas con un nivel de Severidad Baja de 790.83 Ha, que equivale al 40.66% del área evaluada; seguido del nivel de Severidad Moderada – Baja con un área de 733.34 Ha (37.7% del área total); luego se ubicó el nivel de severidad Moderada - Alta con 306.83 Ha (representando un 15.77% del total); mientras que 5.89 Ha del área afectada pertenece a zonas quemadas con Severidad Alta (equivale un 0.3% del total); la superficie evaluada del incendio también presentó áreas no quemadas con 108.08 Ha (5.56% del área evaluada). Finalmente, se evidenció que el índice NBR y los Sistemas de Información Geográfica ayudan en el análisis de los incendios forestales y en la estimación de su severidad.

*Palabras clave:* incendios forestales, severidad del incendio, NBR, dNBR, landsat 8.

### **Abstract**

The main objective of this research was to apply the Normalized Burned Area Index (NBR) and Geographic Information Systems (GIS) to estimate the severity of forest fires in the department of Cusco. The method was quantitative, descriptive and cross-sectional. The methodology used was the difference of the NBR spectral index (dNBR) with reflectance images from the Landsat 8 satellite (pre-fire and post-fire); carried out using a script in the Google Earth Engine (GEE) Platform and analyzed with ArcGIS Pro software, for a large fire that occurred in 2016 in the district of Coporaque, province of Espinar, Cusco. The main results were the severity levels of the great fire, with a total evaluated area of 1,945.14 Ha and a burned area of 1,836.89 Ha. Most of the fire scars presented burnt areas with a Low Severity level of 790.83 Ha, which is equivalent to 40.66% of the evaluated area; followed by the Moderate Severity level - Low with an area of 733.34 Ha (37.7% of the total area); then the Moderate - High severity level was located with 306.83 Ha (representing 15.77% of the total); while 5.89 Ha of the affected area belongs to burned areas with High Severity (equivalent to 0.3% of the total); the evaluated surface of the fire also presented unburned areas with 108.08 Ha (5.56% of the evaluated area). Finally, it was shown that the NBR index and the Geographic Information Systems help in the analysis of forest fires and in the estimation of their severity.

*Keywords:* forest fires, fire severity, NBR, dNBR, landsat 8.

## I. INTRODUCCIÓN

El Perú ha sido reconocido como uno de los diecisiete países llamados megadiversos, por ser poseedores en conjunto de más del 70 % de la biodiversidad del planeta. La biodiversidad del Perú está representada por una gran variedad de ecosistemas, especies de flora y fauna, y diversidad genética, que han contribuido y contribuyen al desarrollo y la sostenibilidad mundial (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2014, p. 14).

Sin embargo, la alteración de la dinámica de la cubierta terrestre se considera actualmente como la variable individual más importante del cambio global que afecta a los sistemas ecológicos. Los incendios forestales se consideran una de las perturbaciones ecológicas más generalizadas de los ecosistemas naturales que afectan drásticamente la dinámica de la cobertura terrestre en una variedad de escalas espaciales y temporales como resultado de la eliminación total o parcial de cubierta vegetal (Petropoulos et al., 2014).

En ese contexto, el conocimiento del grado de daño causado por el fuego, es decir la severidad que trae consigo un incendio forestal es de suma importancia, juega un papel importante en diversos aspectos de la política y la toma de decisiones. Es por ello, que la presente investigación determinó la severidad de los incendios forestales, permitiendo complementar la información que maneja el Comité técnico Regional de incendios forestales (entre ellas la Oficina de Gestión del Riesgo de Desastres y Seguridad del Gobierno Regional del Cusco y el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre – SERFOR); y pueda servir como insumo para la toma de decisiones de proyectos de recuperación ecológica. También ayude a las instituciones públicas y privadas en general para las posteriores acciones de post-incendio.

Para esta investigación, se optó en primera instancia de realizar un diagnóstico de las variables físicas y biológicas del departamento de Cusco, con la finalidad de conocer qué tipo

de ecosistemas, cobertura vegetal, clima, zonas de vida, entre otros, posee el departamento en estudio. Como segundo objetivo, analizar la distribución espacial y temporal de las ocurrencias de incendios forestales a nivel nacional en un periodo de años del 2000 al 2021; utilizando Sistemas de Información Geográfica, determinando así que el departamento de Cusco es uno de los departamentos más afectados actualmente por estos eventos. Asimismo, los años de mayor ocurrencia de incendios han sido los años 2005, 2010 y 2016; relacionándolos con los eventos de sequía extrema ocurridos en esos años entre los meses de agosto y noviembre. Para los años 2019, 2020 y 2021, se tuvo como resultado un incremento exponencial de estas ocurrencias; esto se podría relacionar con que exista una información más robusta desde el año 2019.

Por otro lado, determinar los niveles de severidad de un gran incendio forestal ocurridos en Cusco, con la finalidad de contar con nuevas tecnologías de aplicación que permitan mapear cicatrices de incendios y evaluar el grado de severidad. Siendo este, el objetivo fundamental de esta investigación y para ello, se realizó la aplicación del índice normalizado de área quemada (NBR) en el departamento de Cusco. Determinando así, la severidad de un gran incendio forestal ocurrido en el año 2016 en el distrito de Coporaque, provincia de Espinar, con la ayuda de la Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Para estimar la severidad del incendio se aplicó el índice NBR utilizando imágenes satelitales Landsat 8 (pre-incendio y post-incendio); luego se realizó la diferencia de estos resultados (dNBR), restando el NBR pre-incendio con el NBR post-incendio para obtener la severidad del incendio ocurrido en Coporaque. Toda esta información se procesó en la Plataforma Google Earth Engine (de libre acceso) y se materializó con el software ArcGIS Pro.

En el primer capítulo, se muestran los problemas relacionados a los incendios forestales en el departamento de Cusco. Asimismo, los objetivos, que están sustentados en base a la justificación. En el segundo capítulo, se ha realizado el marco teórico, donde se considera

información relacionada a los incendios forestales, sus causas y consecuencias. También, información sobre la teledetección y Sistemas de Información Geográfica, que nos ha servido para mapear la severidad de incendios y evaluar la misma. En el tercer capítulo, se detalla el tipo de investigación, las variables, instrumentos y procedimientos de recopilación de información, sistematización, metodología empleada, procesamiento y representación gráfica.

En el cuarto capítulo, se muestra al departamento de Cusco en base a su ubicación geográfica, política y accesibilidad. Además, la interpretación de los resultados del diagnóstico de las variables físicas y biológicas del ámbito de estudio, la distribución espacial y temporal de los incendios forestales a nivel nacional, departamental y provincial; y el mapeo y evaluación de la severidad de un gran incendio forestal en Cusco; cumpliendo así con los objetivos planteados. En el quinto capítulo, se presenta la discusión de los resultados, en los cuales se comparó los resultados obtenidos con los resultados de otras investigaciones descritas en antecedentes. En el sexto, séptimo y octavo capítulo, se describen las conclusiones, las recomendaciones y las referencias bibliográficas respectivamente de la presente investigación. Por último, el noveno capítulo desarrolla los anexos, las cuales se detalla los pasos del script de mapeo de severidad de incendios forestales.

## **1.1. Descripción y formulación del problema**

### ***1.1.1. Descripción del problema***

El incendio forestal, “es el fuego que se extiende sin control, cuyo combustible principal es la cobertura vegetal viva o muerta” (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2014, p. 13). Este fuego, ha sido históricamente una fuerza evolutiva de la naturaleza tanto en las especies biológicas, como en los ecosistemas y en el paisaje. Sin embargo, los cambios de uso del suelo ocurridos durante los tres últimos siglos en los distintos continentes, conjugados con los cambios climáticos de carácter global y regional, han conllevado a la alteración de los patrones naturales de ocurrencia de este fenómeno en la mayor parte de los

ecosistemas con coberturas vegetales, transformándolos, disminuyendo su biodiversidad y comprometiendo su capacidad productiva (Campo y Bernal, 2010, pp. 67-68).

Durante la última década, muchas regiones del mundo han experimentado una tendencia creciente hacia la aplicación excesiva del fuego en los sistemas de uso y de cambio de uso de las tierras, y hacia incendios extraordinariamente graves. Algunos de los efectos de los incendios traspasan las fronteras, por ejemplo, el humo y la contaminación del agua y sus efectos sobre la salud y la seguridad humana, la pérdida de biodiversidad y la degradación del sitio a nivel del paisaje, lo que lleva a la desertificación, la erosión del suelo o las inundaciones (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2007, p.3).

Cada año se produce una media de más de 100.000 incendios, llamados también incendios forestales, que queman entre 1,6 y 2 millones de hectáreas de terreno cada año. Mientras que, en los últimos años, los incendios han consumido hasta 3,6 millones de hectáreas (National Geographic, 2010). En este contexto de nivel mundial, la situación de los incendios forestales en el Perú no pasa desapercibida, teniendo así un aproximado de 18300 incendios reportados en los últimos 22 años. Siendo el departamento de Cusco el más afectado hasta el momento; contando con más de 2900 incendios forestales, de los cuales han afectado y afectan a los diversos ecosistemas que este departamento presenta, entre los principales tenemos: pajonal de puna húmeda y el bosque montano de yunga. También afectan las funciones de los servicios ecosistémicos, como la regulación del agua; ya que hidrológicamente, los ecosistemas dominados por pajonales recolectan, almacenan y suministran el agua que suple las necesidades domésticas, agrícolas, de riego, hidroeléctricas y recreativas en la región. Es por ello, que el agua producida por los pajonales es de suma importancia para el desarrollo socioeconómico de los países ubicados en el norte y centro de la cordillera de los Andes. Además, estos pajonales naturales sirven principalmente para el pastoreo de ganado y el cultivo de alimentos. Sin embargo, los incendios asociados a dichas actividades representan el impacto humano más

significativo en estos ecosistemas (Mosquera et al., 2022). Ante los diferentes ecosistemas existentes, debido a sus características y los elementos que los componen, el impacto del fuego será diferenciado, es por ello que se verá reflejado en su severidad. Usualmente la severidad del fuego se emplea para referirse al nivel de daño o perturbación causada por el fuego en el conjunto del ecosistema o en alguna de sus características (Key y Benson, 2006, como es citado en Arellano et al., 2017).

### ***1.1.2. Formulación del problema***

#### **Problema General**

- ¿De qué manera la aplicación del índice normalizado de área quemada (NBR) y los Sistemas de Información Geográfica estimarán la severidad de los incendios forestales en el departamento de Cusco?

#### **Problemas Específicos**

- ¿Cómo se realizaría un diagnóstico de las variables físicas y biológicas del departamento de Cusco?
- ¿Cómo se analizaría la distribución espacial y temporal de las ocurrencias de incendios forestales a nivel nacional y del departamento de Cusco?
- ¿Cómo se podría estimar la severidad de un gran incendio forestal ocurrido en el departamento de Cusco?

## **1.2. Antecedentes**

### ***1.2.1. Antecedentes internacionales***

Rodríguez y Ríos (2017) en el trabajo de pregrado de especialización titulada “Identificación de áreas quemadas por incendios forestales en el departamento del Meta y determinación de medidas de intervención para su reducción”, de la Universidad Católica de Manizales; Colombia. Cuyo objetivo fue, identificar las áreas quemadas por incendios forestales (cicatrices) para el año 2016 a través del procesamiento de imágenes satelitales.

Metodológicamente se basó en una comparación espectral de índices NBR (Normalized Burn Ratio), tomando como referencia los registros oficiales de los puntos de calor generados por el sensor MODIS en su proyecto FIRMS; desarrollándose en tres fases: adquisición de la información de partida, extracción de las áreas quemadas y validación de resultados. En la primera se emplearon 8 imágenes del sensor LANDSAT 8. Luego, se emplearon índices espectrales ajustados a la señal del carbón, para las áreas quemadas. Finalmente, se aplicaron criterios de contexto para refinar la delimitación de los perímetros quemados. Teniendo como resultado 467986.57 ha afectadas por 5817 polígonos de incendios en el 2016. Los meses según focos de calor donde se presentaron aumentos considerables fueron de diciembre a marzo.

Lara (2017) en la tesis de grado titulada “Análisis multitemporal de cicatrices de quemas en bosques durante el periodo 2009 a 2014 en la Provincia Cordillera, Santa Cruz, Bolivia”, de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno; Bolivia. Cuyo objetivo fue, analizar espacial y multitemporalmente las cicatrices de quemas mediante un algoritmo de teledetección de árbol de decisiones. Metodológicamente se analizó la totalidad del área de estudio usando imágenes Landsat 5 y 8 para un periodo de cinco años, generando imágenes fraccionales de miembros puros: Vegetación Fotosintética, Vegetación No Fotosintética, Suelo y Sombras; luego se aplicó el Índice de Diferencia de Fracciones para analizar las imágenes a nivel subpíxel y finalmente se aplicó el algoritmo de clasificación Árbol de Decisiones. Teniendo como resultado que en los cinco años de estudio la superficie total de quemas en bosque fue de 9.287 ha, las quemas en otras coberturas fueron 35.743 ha y en total sumaron 45.030 ha. El municipio más afectado fue Charagua con 15.659 ha, seguido de Cabezas con 14.918 ha, los demás municipios presentaron superficies menores de quemas.

Rodas (2015) en la tesis de grado titulada “Análisis del comportamiento de incendios forestales en la cuenca del río Paute mediante sensores remotos”, de la Universidad de Cuenca; Ecuador. Cuyo objetivo fue, identificar el comportamiento de los incendios forestales mediante

sensores remotos y sistemas de información geográfica. Metodológicamente primero se buscaron, seleccionaron y corrigieron imágenes satelitales Landsat 8 (años 2013 y 2014) y fotografías aéreas (años 2010-2012); después mediante el cálculo de índices espectrales se clasificaron los tipos de cobertura vegetal e identificaron las zonas quemadas (el índice que mostró mejores resultados fue el NBR). Finalmente, en función de los patrones obtenidos se describió el comportamiento de los incendios forestales en la cuenca de estudio. Teniendo como resultado las muestras en donde se localizan las áreas que concentran la mayor parte de los incendios, el área total de superficie quemada y las variables analizadas que influyen en mayor medida en la ocurrencia de las quemas.

Borini (2018) en la tesis doctoral titulada “Series multitemporales Landsat/MODIS en el análisis de áreas quemadas en ambientes de Sabana Tropical de la Amazonía Meridional Brasileña”, de la Universidad de Zaragoza; España. Cuyo objetivo fue, analizar los patrones espaciotemporales y la dinámica de regeneración vegetal de áreas afectadas por el fuego, centrando el análisis en un área que constituye el mayor enclave de sabana tropical del sur de la Amazonía, los Campos Amazónicos; metodológicamente se explora el uso de las series multitemporales derivadas de los sensores/satélites Landsat y MODIS, buscando combinar el potencial de cada serie en la generación y análisis de informaciones anuales/estacionales que contribuyan a la interpretación de la incidencia del fuego y sus repercusiones en la dinámica de estos paisajes. Teniendo como resultado un total de 1.03 millones de hectáreas afectadas por el fuego en el área de estudio (prácticamente 2.5 veces su área total), en el período comprendido entre 2000 y 2016. Logrando identificar una fuerte influencia de la estacionalidad en los subtotales anuales, donde las cicatrices de fuego de los meses más extremos de sequía representan el 86% del total de área quemada y el 32% del número de incendios.

Ariza (2017) en la tesis doctoral titulada “Análisis de los cambios en la estructura del paisaje por incendios forestales mediante teledetección”, de la Universidad de Alcalá; España.

Cuya metodología se basó para ello en métricas de paisaje y técnicas de teledetección, mediante el uso de índices espectrales derivados de imágenes Landsat TM, ETM+ y OLI (NDVI, NBR, dNDVI, dNBR, RdNBR, RBR), con el fin de analizar los patrones espacio-temporales producidos por el fuego y más específicamente por la severidad del incendio. Evaluando así diferentes técnicas de cartografía de severidad del incendio, la caracterización de la estructura del paisaje y los cambios espacio-temporales producidos en este en función del nivel de severidad; estos análisis se realizan a partir de mediciones realizadas en campo, que evalúan los efectos inmediatos post-incendio (Post-Fire Effects - PFE), concretamente el Índice Compuesto de Severidad (CBI) y su variante GeoCBI. Teniendo como resultado que el índice más idóneo para la clasificación de severidad de incendios es el RBR, en cuanto a los algoritmos de clasificación, el método bayesiano ofreció mejores resultados que la regresión lineal; respecto a las métricas de paisaje sobre variables categóricas en los incendios de Riba de Saelices (Guadalajara) y el pantano de San Juan (Madrid), se presentó una mayor fragmentación del paisaje en los periodos post-incendio, dado el incremento en los índices de área.

### ***1.2.2. Antecedentes nacionales***

Añamuro et al. (2020) en el artículo titulado “Análisis de incendios forestales en pajonales andinos utilizando Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, Macarí – Puno”. Tuvo como objetivo estimar el área quemada y la severidad ocasionada por un incendio en el distrito de Macarí en el año 2016, utilizando imágenes satelitales Landsat 8 OLI y el producto MODIS (MCD45A1). Con la ayuda de NBR y  $\Delta$ NBR delimitaron el área quemada de 2 458.673 hectáreas y lograron determinar que el incendio en su mayoría fue de una Severidad Baja con 1 385.145 hectáreas; seguida de una Severidad Media con un área de 967.568 hectáreas.

Fernández (2018) en la tesis de grado titulada “Evaluación de la superficie deforestada por efecto de los incendios forestales durante el periodo 2011 - 2016 en el distrito Las Piedras - Tambopata - Madre de Dios”, de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Cuyos objetivos fueron, cuantificar la superficie deforestada por medio de cicatrices de quemas por incendios e identificar el comportamiento dinámico espacial a través de la teledetección para construir la serie de anomalías térmicas o focos de calor. Metodológicamente se utilizó el sensor MODIS para los tres periodos (2011, 2013, y 2016). La validación se realizó aplicando el cociente normalizado de quemas (NBR) en imágenes LANDSAT (2011 y 2013) y Sentinel 2A (2016). Teniendo como resultado que los focos de calor del satélite MODIS en el distrito de Las Piedras, periodos 2011, 2013 y 2016, muestran una tendencia creciente, por lo que se puede presumir el incremento de las prácticas de roza y quema en las actividades agropecuarias; en cuanto a distribución espacial, si bien presenta una autocorrelación positiva, esta es muy baja, no siendo ni disperso ni agrupado, tendiendo a una distribución aleatorizada.

Lau (2017) en la tesis de grado titulada “Utilización del índice meteorológico de incendios forestales (fire weather index) en el departamento de Cusco”, de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Cuyo objetivo fue, aplicar el índice canadiense “Fire Weather Index” empleando datos meteorológicos de re-análisis atmosférico ERA- Interim y los registros de incendios forestales disponibles dentro del periodo 1995 -2014. Metodológicamente el esquema general del índice resume el origen y el sentido que tomarán cada uno de los componentes del FWI para sus diferentes fases. Teniendo como resultado que los datos obtenidos con el FWI responden satisfactoriamente con los del registro de incendios; en los meses de verano se detecta en toda la región niveles bajos de peligrosidad referente al desarrollo de incendios. Las categorías “muy bajo” y “bajo” son fuertemente reconocidos entre los meses de enero a mayo y noviembre a diciembre, los otros meses corresponden a temporada

de invierno parte de primavera donde el índice las reconoce como “alto” y “extremo”, respecto al mes de agosto con el máximo de incidencias el índice respondió con “extremo”.

Malpartida (2016) en la tesis de grado titulada "Riesgo a incendios forestales en la provincia de Satipo – Junín”, de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Cuyo objetivo fue, identificar el nivel de riesgo a incendios forestales. Metodológicamente se identificaron estas áreas por medio de la aplicación de distintas herramientas y metodologías entre ellas tenemos a la teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y al análisis multicriterio; que ofrecen una apropiada forma de adquirir información de casi todo el terreno incluso de las áreas donde la accesibilidad es limitada, con esto permitirán la generación y producción de datos e información con la aplicación del software ArcGis V.10.2 y ENVI V.5.1. Teniendo como resultado que el 80,4% de la provincia de Satipo presenta un nivel moderado de riesgo a incendios forestales, seguido de un 15,8% de nivel bajo, un 3,7% de nivel alto y un 0,005% de nivel muy bajo.

Jimenez y García (2020) en la tesis de grado titulada "Resiliencia de la cobertura vegetal post incendio forestal aplicando índices espectrales de vegetación – Distrito de Chulucanas - Departamento de Piura, 2019”, de la Universidad Nacional de Tumbes. Metodológicamente se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2 y el software QGIS 3.6 para el pre procesamiento y procesamiento, donde se obtuvo los índices espectrales NDVI, SAVI y NBRI y con los valores promedios mensuales se generó las tendencias de reflectancia de la vegetación del área afectada y testigo; se analizó también el registro de precipitaciones de la estación meteorológica de “CHULUCANAS” con el propósito de relacionarlo con la reflectancia de la vegetación. Teniendo como resultado la similitud en el comportamiento de las tendencias del NDVI, SAVI y NBRI en el área afectada, sus valores tienden a elevarse por el aumento de la biomasa vegetal causada por las precipitaciones. Al compararse las tendencias de ambas zonas de estudio se

obtiene semejanza en sus valores en un periodo menor a 2 años demostrando una rápida recuperación de su cobertura vegetal.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo general***

Aplicar el índice normalizado de área quemada (NBR) y Sistemas de Información Geográfica para estimar la severidad de los incendios forestales en el departamento Cusco.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Realizar un diagnóstico de las variables físicas y biológicas del departamento de Cusco.
- Analizar la distribución espacial y temporal de las ocurrencias de incendios forestales a nivel nacional y del departamento de Cusco.
- Estimar los niveles de severidad de un gran incendio forestal ocurridos en Cusco.

### **1.4. Justificación**

Ligado a las pérdidas económicas, un solo evento de un incendio forestal puede causar pérdidas cuantiosas que bordean 1 millón de soles, como los incendios ocurridos en Arequipa en el 2018 o llegar a costar más de 150 millones de soles como los eventos ocurridos en el 2016 en el norte del país. Asimismo, se puede contabilizar pérdidas en el capital natural del país, reduciendo o eliminando algunos servicios ecosistémicos como la regulación hídrica, control de la erosión, belleza paisajística, recreación y ecoturismo, entre otros, con los consecuentes efectos sociales, económicos y ambientales que afectan a gran parte de los sectores productivos y de servicios (MINAM, 2019b, p. 1). Estas pérdidas del capital natural, en el tiempo se pueden recuperar. Pero esta recuperación se realizaría en corto, mediano o largo plazo, dependiendo a cómo quedó la zona afectada por un incendio forestal, teniendo que priorizar algunas zonas y esa priorización se podría determinar con sistemas de monitoreo. Sin embargo, Perú forma parte de los países que no cuenta con sistemas apropiados de monitoreo de incendios, que

incluyan un sistema de registro continuo y robusto, con el apoyo de sensores remotos (teledetección) o una fuente sistemática de información sobre las superficies afectadas por incendios (Bilbao et al., 2020).

Es por ello, que este trabajo se justifica en la necesidad de contar con metodologías de fácil manejo y aplicación de monitoreo y evaluación de incendios forestales, determinando así la superficie afectada y el grado de afección de la misma (severidad).

### **1.5. Hipótesis general**

Aplicando el índice normalizado de área quemada (NBR) y Sistemas de Información Geográfica se estima la severidad de los incendios forestales en Cusco.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

#### 2.1.1. *Incendios forestales*

Mansanet (1987) manifiesta que el incendio forestal “supone un fenómeno de combustión rápida, violenta, de compuestos químicos contenidos en las formaciones vegetales, liberando grandes cantidades de energía en forma de luz y calor” (p. 17). El MADS de Colombia (2014), menciona que el incendio forestal “es el fuego que se extiende sin control, cuyo combustible principal es la cobertura vegetal viva o muerta” (p. 13). El Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR, 2018) la define como “fuego no deseado de cualquier origen, que no es estructural, que se propaga sin control en los recursos forestales, causando daños ecológicos, económicos y sociales” (p. 51).

**2.1.1.1. Factores del incendio forestal.** Mansanet (1987) menciona que un incendio forestal no se desarrolla siempre de la misma forma, intervienen en él factores biológicos, factores climatológicos y factores topográficos. Los factores biológicos dependen básicamente de la composición, estructura y disposición de la masa vegetal objeto de incendio (p. 17). Los factores climatológicos, sin duda, pueden modificar extraordinariamente el desarrollo de un incendio forestal, sin dejar al hombre otra posibilidad de intervención en su control, que la que se refiere a su prevención y detección. Dos son principalmente los factores climatológicos que más influyen en el desarrollo de un incendio: la presencia, intensidad y dirección del viento, en cuanto que supone un aporte constante y violento de oxígeno para continuar la combustión iniciada; y el grado de humedad de la atmósfera y de la vegetación, que dificulta la combustión hasta hacerla desaparecer; pues buena parte de la energía desarrollada y que mantiene el incendio se debe emplear en evaporar grandes cantidades de agua del ambiente y de los tejidos vegetales (p. 20). En cuanto a los factores topográficos, determinan, en ausencia de viento, cuál

será el frente de avance más probable de las llamas que resulta ser casi siempre ladera arriba y con el mismo sentido que el viento reinante. En las mismas condiciones de vegetación y clima, la topografía condiciona la velocidad de avance del fuego que será mayor en laderas más abruptas al transmitirse mejor el calor por convección y radiación, determinando un frente de desecación inmediato al frente de avance de las llamas que facilita enormemente la extensión del incendio (p. 21).

**2.1.1.2. Causas del incendio forestal.** En el Perú se distinguen diferentes causas de los incendios forestales y la podemos describir conforme a la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Causas de los Incendios forestales en el Perú*

<b>Región</b>	<b>Causas</b>
<b>Región Amazónica</b>	Demanda de tierras por el sector agrícola (palma africana, cacao, frutales), las actividades extractivas (minería, extracción del petróleo), nuevas vías terrestres; generando cambio de uso de suelo y la aplicación de fuego para la eliminación de la vegetación, ocasionalmente este fuego se sale de control y ocasiona los incendios forestales.
<b>Región Andina</b>	Se requieren pastos renovados que son más apetecibles para el ganado y la ampliación de terrenos agrícolas. Para ello, es frecuente que se utilice la quema; sin embargo, estas prácticas no controladas pueden generar incendios forestales. Asimismo, existen especies exóticas como el Eucalipto y el Pino, que contienen aceites volátiles en sus hojas, por ende, facilitan la expansión de los incendios.
<b>Región Norte</b>	Ocasionados por los “mieleros”, dedicados a coleccionar la miel de abeja, quienes queman la base del árbol para ahuyentar a las abejas. Además, existe un tipo de pasto “Passiflora” que cuando la temperatura se eleva, los frutos eclosionan y pueden causar estos incendios. Asimismo, la preparación de terrenos para las campañas agrícolas, generan los incendios en los bosques secos.
<b>Región Interandina</b>	Entre la región Andina y la Amazonía (ceja de selva), las zonas de bosque de niebla y otros tipos de asociaciones se ven amenazadas por el uso del fuego para el manejo de las “chacras”, por lo que esta actividad es una de las más importantes en estas condiciones de terreno. Esta zona presenta una topografía extrema, y es precisamente el lugar donde existe un importante asentamiento poblacional. El departamento de Cusco está enclavado en esta zona y se considera como una zona de alto riesgo por incendios forestales

*Nota.* Elaboración propia. Información tomada de SERFOR, 2018, Plan de prevención y reducción de riesgos de incendios forestales.

**2.1.1.3. Consecuencias del incendio forestal.** Según el SERFOR (2018) las consecuencias que traen consigo los incendios forestales se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Consecuencias de los Incendios forestales en el Perú*

<b>Componente</b>	<b>Consecuencias</b>
<b>Sobre el suelo y el agua</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pérdidas de cobertura forestal en las cabeceras de cuenca generan la desaparición de fuentes de agua.</li> <li>- Desaparición de la materia orgánica existente, generándose cambio de hábitats para muchos invertebrados, requiriéndose cientos o miles de años para su recuperación.</li> <li>- Al ser quemada la capa orgánica (humus), tanto el nitrógeno como el azufre se volatilizan, mientras que los demás elementos minerales del suelo se hacen solubles por lo tanto son arrastrados con el agua de escorrentía, perdiéndose la fertilidad y provocando la erosión de este.</li> <li>- La falta de infiltración, normalmente favorecida por la presencia de coberturas vegetales, disminuye la formación de las aguas subterráneas (napa freática).</li> </ul>
<b>Sobre la flora y fauna</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se generan cambios en las estructuras de los bosques y la cobertura general de los ecosistemas, así como en su composición florística (esto se aprecia en las purmas o formaciones secundarias en los lugares donde han ocurrido incendios).</li> <li>- Alteran los ecosistemas, sus recursos genéticos y sus interacciones.</li> <li>- Destrucción de madera, con impacto negativo en la economía de las poblaciones circundantes.</li> <li>- Debilitamiento de los árboles, dejándolos susceptibles al ataque de plagas y enfermedades.</li> <li>- Favorecen la invasión de especies indeseables e invasoras.</li> <li>- Degradan los pastizales, reduciendo la palatabilidad para el ganado y la fauna silvestre.</li> <li>- Destruye el hábitat natural de los animales silvestres y la exposición de estos al ataque de depredadores.</li> <li>- Provoca la migración de animales a otros espacios.</li> <li>- Produce mortandad de animales.</li> <li>- Las plagas y enfermedades aparecen con mayor intensidad.</li> </ul>
<b>Sobre la atmósfera y salud</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El humo y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que generan los incendios, quedan suspendidos en el aire y los vientos pueden arrastrarlos hacia las ciudades, contaminando la atmósfera en los espacios cercanos.</li> <li>- Este humo suspendido puede provocar enfermedades en las vías respiratorias, dolores de cabeza, fiebre y enrojecimiento de la vista.</li> <li>- El CO<sub>2</sub> generado por los incendios forestales, es un gas de efecto invernadero y contribuyen al cambio climático.</li> <li>- Disminución del O<sub>2</sub> de las vegetaciones que lo producen (debido a las quemadas), con la consecuente afectación al microclima del lugar.</li> </ul>
<b>Socioeconómicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deterioro del paisaje (suelos pobres, abandonados y sin cobertura vegetal), reduciendo su belleza escénica y valor económico.</li> <li>- Afectan otros bienes distintos a los forestales (estructuras, culturales, etc.).</li> <li>- Genera daños, lesiones y fallecimiento de combatientes (pobladores, bomberos, guarda parques, policías).</li> <li>- Propician opinión pública adversa hacia las autoridades a cargo de la coordinación o combate de los incendios.</li> </ul>

*Nota.* Elaboración propia. Información tomada de SERFOR, 2018, Plan de prevención y reducción de riesgos de incendios forestales.

**2.1.1.4. Herramientas en temas de incendios forestales.** La Dirección General de Ordenamiento Territorial Ambiental (DGOTA) del Ministerio del Ambiente como parte de la gestión del territorio realiza el Monitoreo de las Condiciones favorables para la ocurrencia de incendios (CFOI). Este monitoreo se refleja mediante Mapas de CFOI, elaboradas por departamento a nivel nacional con temporalidad mensual, esta información se encuentra en la Plataforma “Geoservidor” (ver Figura 1). Siendo una herramienta de carácter preventivo para la toma de decisiones de autoridades y equipos técnicos a fin de reducir los impactos de estos incendios sobre los ecosistemas y medios de vida de la población (MINAM, s.f.).

**Figura 1**

*Plataforma GEOSERVIDOR*



*Nota.* Plataforma del MINAM.

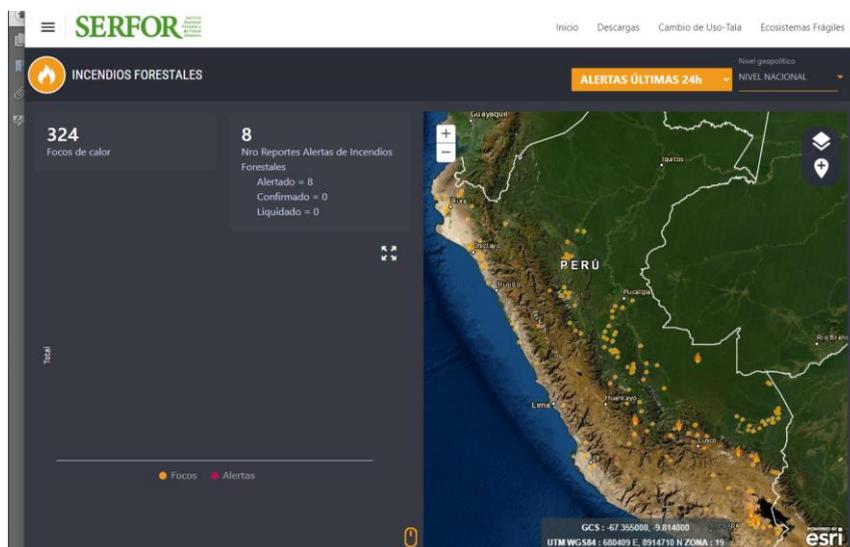
<https://geoservidor.minam.gob.pe/monitoreo-y-evaluacion/cfoi/>

SERFOR, tiene como herramienta un Visor de datos espaciales llamado “Geoserfor” (ver Figura 2). Esta plataforma brinda información preventiva que se genera diariamente a través de los Reportes de Focos de Calor, los cuales brindan una alerta de la existencia de fuego activo para que las autoridades tomen las acciones necesarias, ya que podría desencadenarse

un incendio forestal. Cuando este sea identificado se genera un reporte de Alerta de Incendio Forestal.

## Figura 2

### Plataforma GEOSERFOR



*Nota.* Plataforma del SERFOR.

<https://geo.serfor.gob.pe/monitoreosatelitalforestal/incendios.html>

Además, SERFOR trabaja con diversos sectores involucrados en la prevención y respuesta de los incendios forestales. Plantean campañas de prevención para recoger la realidad rural y ofrecen información actualizada y oportuna; y que, a su vez, presenten alternativas a la población para evitar el uso indiscriminado del fuego, como la producción y uso del compost (ya que la mayoría de los incendios forestales están relacionados con la habilitación de chacras de cultivo, quema de pastos, malezas y rastrojos). También, se encarga de la evaluación post incendio del área afectada, pudiendo iniciar acciones de restauración ecológica (SERFOR, 2022).

### **2.1.2. Teledetección**

Chuvieco (1995) menciona que la teledetección es “aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre” (p. 45).

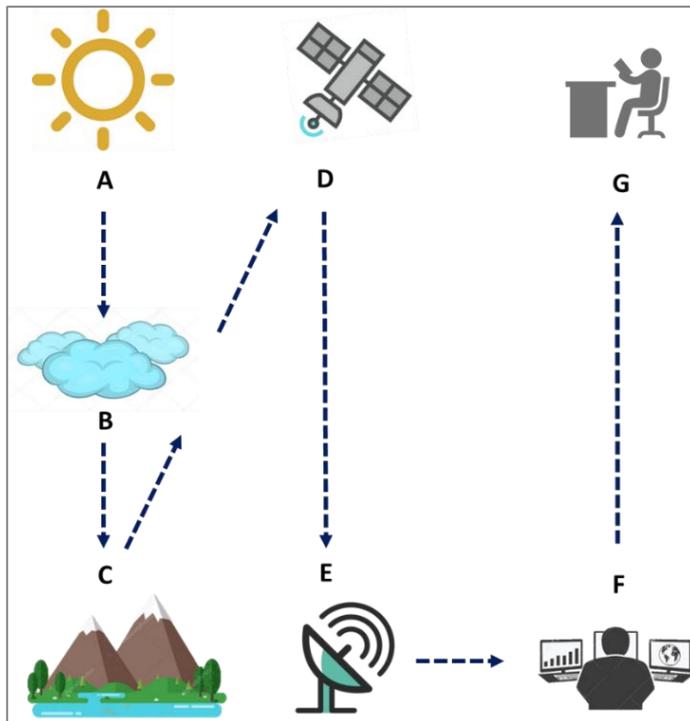
La teledetección según Labrador et al. (2012), es el vocablo usado por los hispanoparlantes para referirse al término inglés “remote sensing”, que se traduce literalmente como percepción remota. Se refiere a la ciencia, técnica o, incluso “arte” para algunos, de obtener información (imágenes) de la superficie de nuestro planeta a distancia, sin entrar en contacto directo con él (p. 9).

Según la Office of Technology Assessment – OTA (1984) la teledetección tiene múltiples aplicaciones; como son el estudio de la erosión de playas y arenales, inventario del agua superficial, cartografía de la cobertura vegetal del suelo, rápida evaluación de condiciones de estrés en la vegetación por efectos de la sequía o deforestación, cartografía de áreas quemadas y seguimiento de los ritmos de repoblación natural, contribución a la cartografía e inventario de la cobertura y uso del suelo, realización de inventarios forestales, cartografía e inventario de cultivos por especies, selección de rutas óptimas para nuevas vías de comunicación, entre otros (citado por Chuvieco, 1995, pp. 40-41).

**2.1.2.1. Componentes de la teledetección.** Los componentes de la teledetección se ejemplifican en la Figura 3.

#### **Figura 3**

*Componentes de un sistema de teledetección*



*Nota.* Elaboración propia.

Una fuente de energía (A), que es el origen de la radiación electromagnética que provee a la cubierta terrestre. Si se habla de una energía externa al sensor (teniendo como fuente principal la del Sol, teledetección pasiva), si la energía es emitida por el mismo sensor (teledetección activa). La atmósfera (B), es la capa en donde se desplaza la radiación electromagnética. Cubierta terrestre (C), conformada por bosque, suelo, agua, construcciones humanas, etc. Que reciben la señal de energía de (A) y la reflejan o emiten su propia energía, de acuerdo a sus características físicas. Sistema sensor (D), constituido por un sensor y la plataforma que lo alberga. Este capta la energía de (C) y (B), las codifica y las graba o envía directamente al Sistema de recepción (E). Donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se realizan procesamientos y los datos se convierten en imágenes digitales, se realizan correcciones y se distribuye a los interesados. Intérprete (F); la imagen procesada se interpreta (visual y/o digitalmente) y se extrae la información de interés, facilitando así la evaluación de un problema en estudio. Usuario final (G); es el que analiza el documento fruto

de la interpretación, nos ayuda a resolver el problema en estudio y dictamina las consecuencias que trae consigo (Chuvieco, 2008, p. 19; Labrador et al., 2012, p. 12).

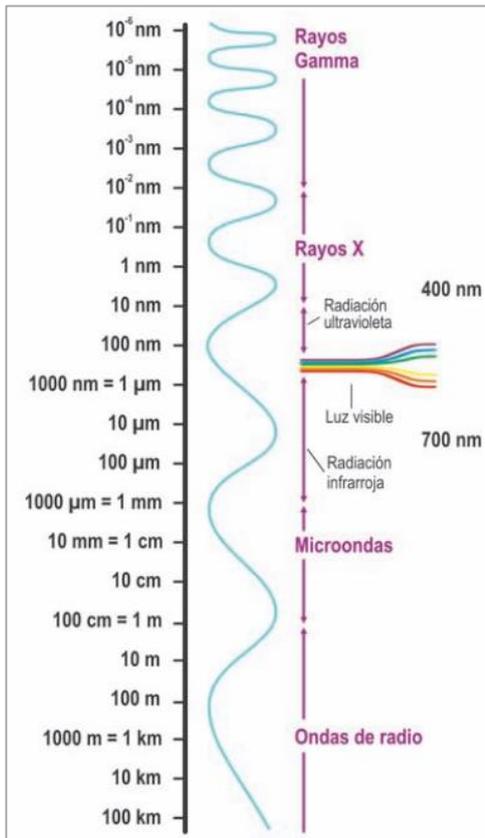
**2.1.2.2. Radiación electromagnética.** Pérez y Muñoz (2006), consideran que los fundamentos de la Teledetección se abordan desde el campo de la Física y más concretamente desde los ámbitos de la óptica y la electrónica. La teledetección es posible gracias a la interacción de un flujo energético con las cubiertas terrestres. Dicho flujo recibe el nombre de radiación electromagnética (p. 3). Luque (2012) menciona que “el flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial y ha sido explicada por dos teorías físicas” (p. 18).

**2.1.2.3. El espectro electromagnético.** Luque (2012) considera que el espectro electromagnético “es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética” (p. 18).

Chuvieco (2008) menciona que el espectro electromagnético es cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético (pp. 45-46). En la Figura 4 se puede apreciar una representación gráfica del espectro electromagnético (unidades en nanómetros,  $1 \text{ nm} = 0.001 \mu\text{m}$ ).

#### **Figura 4**

*Espectro electromagnético*



*Nota.* Tomado de *Espectro electromagnético*, por Labrador et al., 2012. Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio.

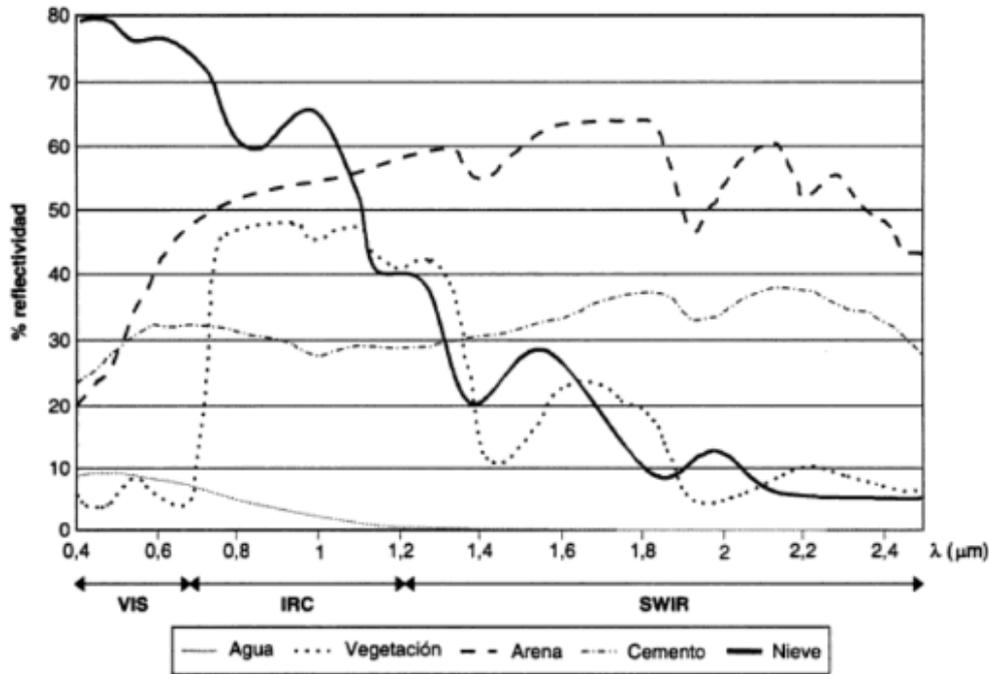
Los sensores montados a bordo de los satélites de teledetección son capaces de detectar y grabar radiaciones de las regiones no visibles del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta las microondas. Los intervalos de longitudes de onda más utilizados en Teledetección reciben las siguientes denominaciones: El visible (VIS) es una pequeña región del espectro electromagnético que apenas abarca desde los 0.4 μm hasta los 0.7 μm. El color azul desde 0.4 hasta 0.5 μm, el verde desde 0.5 μm hasta 0.6 μm y el rojo de 0.6 μm a 0.7 μm. La energía ultravioleta (UV) se encuentra por debajo del color azul. Por encima del rojo se sitúa la región infrarroja (IR), que a su vez está dividida en tres categorías: IR próximo (NIR) (0.7 – 1.3 μm), IR medio (SWIR) (1.3 – 3 μm) e IR térmico (TIR) (3 – 100 μm). La porción de microondas se encuentra más allá del IR, a longitudes de onda mucho más grandes (1 mm – 1

m), que son las longitudes de onda más largas usadas en teledetección (Labrador et al., 2012, p. 13).

**2.1.2.4. Reflectancia espectral.** Es algo fundamental en teledetección, una característica de las superficies terrestres. Definida como la proporción de energía incidente que es reflejada por una superficie (resultando una magnitud adimensional), que puede tomar valores entre 0 y 1 o porcentajes entre 0 y 100%. Este rango puede variar en función de la longitud de onda, dependiendo a la superficie en estudio. Asimismo, denominamos curva de reflectancia espectral o firma espectral, al gráfico de la reflectancia espectral frente a la longitud de onda (Figura 5). Esta configuración de curvas permite extraer las características espectrales de una superficie e influye sobre la elección de la región espectral que se deberá adquirir para alguna aplicación. Por ejemplo, la firma espectral para la vegetación casi siempre manifiesta picos y valles, los valles en el rango visible vienen dados por los pigmentos en las hojas de las plantas. La clorofila absorbe mucha energía en las bandas 0.45 y 0.67  $\mu\text{m}$  y por ello nuestros ojos perciben la vegetación sana de color verde (debido a la gran absorción en azul y rojo por las hojas y la reflexión en el verde). En cambio, en una vegetación “enferma” la clorofila disminuye y el resultado es un aumento de la reflectancia en el rojo, por lo que las hojas se ven con un tono amarillento, siendo este la mezcla de verde y rojo. Respecto al Infrarrojo cercano (0.7-1.3  $\mu\text{m}$ ) la reflectancia de la vegetación sana se incrementa drásticamente, entre el 40 y el 50% de la energía incidente. A partir del 1.3  $\mu\text{m}$  (SWIR) la reflectancia de las hojas decrece bruscamente, es decir es inversamente proporcional a su contenido de agua total, por lo que esta región del espectro es útil para detectar estrés hídrico en la vegetación (Labrador et al., 2012).

### **Figura 5**

*Firmas espectrales de algunas superficies*



*Nota.* Tomado de *Signaturas espectrales típicas para distintas cubiertas (datos adquiridos con un espectro-radiómetro GER-2600)*, por Chuvieco, 2008, Teledetección Ambiental.

### 2.1.3. Satélites y sensores

**2.1.3.1. Satélites.** La palabra satélite del latín, *satelles* o *satellit*, se refiere a un cuerpo que gravita alrededor de un astro o estrella de masa preponderante, en particular alrededor de un planeta. Se refiere a las plataformas que son puestas en órbita en forma artificial, alrededor de la tierra y en las cuales son colocados dispositivos o instrumentos, que son llamados sensores (Pérez, 2007, p. 25).

**2.1.3.2. Sensores remotos.** Para Khorram et. al. (2012) los sensores remotos se definen como “la adquisición y medición de información sobre ciertas propiedades de fenómenos, objetos o materiales mediante un dispositivo de registro que no está en contacto físico con las características bajo vigilancia” (p. 2). Dando un ejemplo, Landsat 8 es un satélite que contiene dos sensores OLI y TIRS.

**2.1.3.3. Características del Satélite Landsat-8.** El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, s.f.) menciona que “Landsat 8 (conocido por primera vez como la Misión de

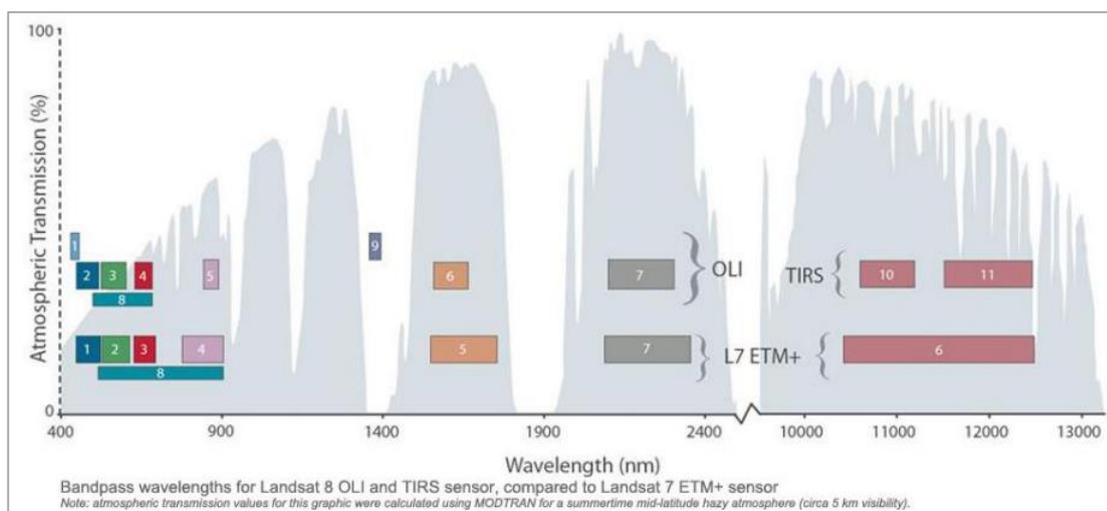
Continuidad de Datos Landsat) se lanzó el 11 de febrero de 2013 desde la Base Vandenberg de la Fuerza Aérea, California, en un cohete Atlas-V”.

El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS).

Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a el sensor Landsat 7 ETM+ (ver Figura 6), proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve. Por otra parte, el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+ (Ariza, 2013, p. 8).

### Figura 6

*Ancho de banda - Sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7*



*Nota.* Tomado de USGS, 2015, como se citó en Ariza, 2013.

La calidad de los datos (relación de la señal en función del ruido) y la resolución radiométrica (12 bits) de OLI y TIRS es más alta que los anteriores instrumentos Landsat (8 bits para TM y ETM+), proporcionando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre. Asimismo, los datos de productos Landsat 8 son totalmente compatibles con todos los datos de los productos estándar a nivel 1 (ortorectificado) creados usando Landsat 1 al Landsat 7 (Ariza, 2013, p. 9). Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) presentan nueve bandas espectrales mostradas en la Tabla 3, con sus respectivas resoluciones espaciales.

**Tabla 3**

*Distribución de las bandas en OLI y TIRS*

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

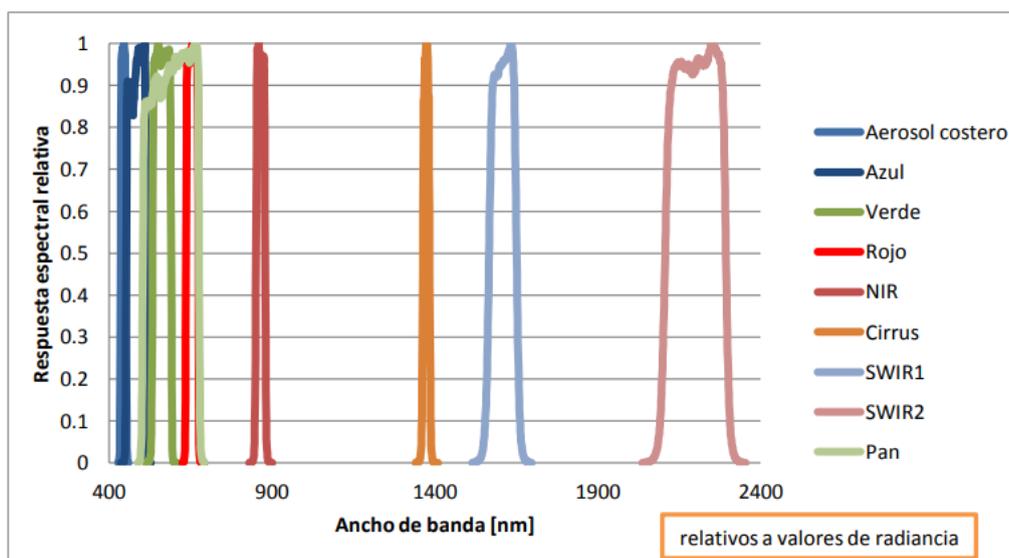
*Nota.* Tomado de USGS, 2015, como se citó en Ariza, 2013.

Se puede mencionar que las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a remuestrear a 30 metros.

La resolución espacial (o nivel de detalle) es a menudo el aspecto más interesante de una imagen de satélite, pero menos apreciado y valorado es cómo se utilizan los cambios en la energía por irradiación reflejada por los materiales de superficie con el fin de lograr identificar las características de interés. Estos aspectos pueden identificarse gracias a la respuesta espectral relativa (RSR) de cada banda mostradas en la Figura 7 (Ariza, 2013, p. 10).

### Figura 7

*Promedio de la Respuesta Espectral Relativa en LDCM*



*Nota.* Tomado de USGS, 2015, como se citó en Ariza, 2013.

#### 2.1.4. Criterios de teledetección en incendios forestales

**2.1.4.1. Monitoreo de incendios forestales.** Chuvieco y Martín (2001) mencionan que “la teledetección espacial se ha empleado hasta el momento principalmente con dos propósitos: identificar los elementos de interés sobre la imagen observada y cuantificar determinadas características de los mismos” (p. 58). Según Chin (2014), “varios satélites de teledetección están disponibles actualmente, proporcionando imágenes adecuadas para la investigación de incendios forestales y operaciones de monitoreo de incendios” (p. 35). “Permitiendo realizar

una cartografía de cicatrices de incendios (post-incendio) obteniendo la cuantificación de superficies de estas áreas en una gran extensión” (Rodríguez, 2012, p. 54).

**2.1.4.2. Cicatrices de incendios forestales.** La cicatriz de un incendio forestal se puede decir que es la huella que deja consigo este evento, es decir el impacto al territorio que tuvo el incendio forestal, caracterizada por diferentes tamaños y composiciones espaciales. La huella marcada en los sistemas forestales, presentan diferencias (FAO, 2011, p. 22). Las cicatrices de incendios forestales son visibles en el corto plazo, lográndose un mapeo de las superficies a sola inspección (en la figura 8 está mapeado de color rojo).

### **Figura 8**

*Incendio forestal en el distrito de Ocoruro, Espinar, Cusco*



*Nota.* Imagen satelital descargada de Sentinel Hub, 2016, <https://www.sentinel-hub.com/explore/sentinelplayground/>.

### **2.1.5. Índices espectrales**

“Un índice espectral es diseñado con el propósito específico de discriminar una cubierta de interés, presentando un comportamiento peculiar con respecto al resto de cubiertas, en una o varias bandas espectrales” (Chuvieco y Martín, 2001, p. 58). En esta investigación se ha

utilizado el índice NBR para la discriminación de incendios forestales y determinar su severidad.

**2.1.5.1. Normalized Burn Ratio (NBR).** “Key y Benson (1999) definieron este índice de calcinación normalizado o índice de proporción de quema normalizada, debido a su utilidad en la estimación de la severidad de un incendio forestal” (citado por Nieto et al., 2011, p. 381). Para ello emplea el contraste entre el infrarrojo cercano (IRC = 0,845 – 0,885  $\mu\text{m}$ , Banda 5 del Landsat 8) por ser sensible al contenido de agua en la vegetación y el suelo; y el infrarrojo de onda corta (SWIR = 2 – 2,3  $\mu\text{m}$ , Banda 7 del Landsat 8) que es sensible a la detección de vegetación sin actividad fotosintética, en el medio post-incendio (Jia et al., 2006, como se citó en Navazo et al., 2016, p. 253). Según Fuentes (2015) la fórmula adaptada para las imágenes del Landsat 8, es la que se visualiza en la ecuación 1.

$$NBR = \left( \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,SWIR}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,SWIR}} \right) * 1000 \quad (1)$$

Donde:

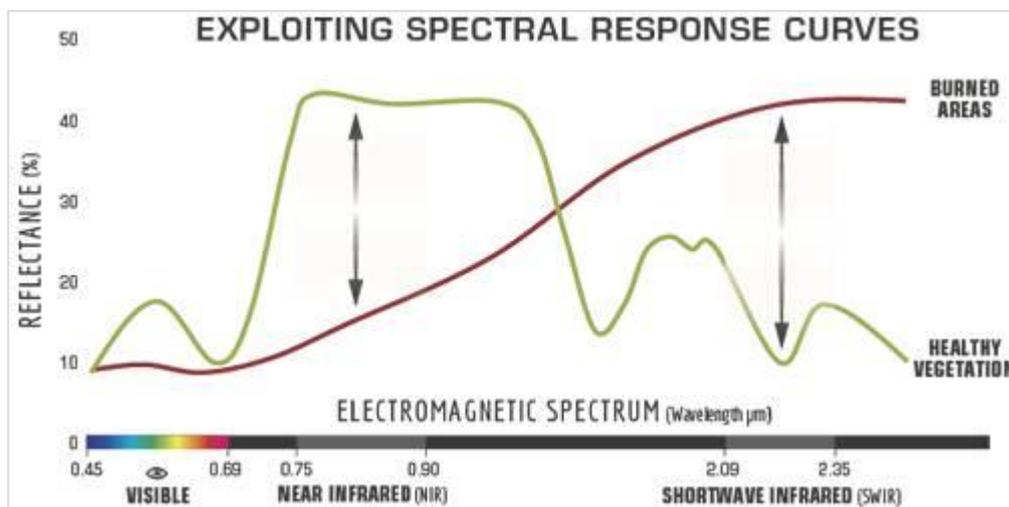
- $\rho_{i,IRC}$  = reflectividad del pixel i en la región del infrarrojo cercano.
- $\rho_{i,SWIR}$  = reflectividad del pixel i en la región del infrarrojo medio de onda corta (p. 537).

El índice Normalizado de Área Quemada (NBR) es un índice diseñado para resaltar áreas quemadas en grandes zonas de incendio. La vegetación saludable muestra una reflectancia muy alta en el NIR y una baja reflectancia en la porción del espectro SWIR (Figura 9), lo contrario de lo que se ve en áreas devastadas por el fuego. Las áreas quemadas recientemente demuestran baja reflectancia en el NIR y alta reflectancia en el SWIR, es decir, la diferencia entre las respuestas espectrales de la vegetación saludable y las áreas quemadas alcanzan su pico en las regiones NIR y SWIR del espectro. Para beneficiarse de la magnitud

de la diferencia espectral, el NBR utiliza la relación entre las bandas NIR y SWIR, de acuerdo con la fórmula que se mostró. Un valor alto de NBR indica vegetación saludable, mientras que un valor bajo indica suelo desnudo y áreas recientemente quemadas. Las áreas no quemadas normalmente se atribuyen a valores cercanos a cero (ONU, s.f.).

### Figura 9

*Firmas espectrales de áreas quemadas vs vegetación saludable*



*Nota.* Tomada de U.S. Forest Service, como se citó en ONU, <https://un-spider.org/es/node/10959>.

**2.1.5.2. Cálculo de la dNBR para evaluar severidad de incendios.** Los valores del dNBR se calculan con la diferencia entre el NBR previo y posterior al incendio, tal como se muestra en la ecuación 2.

$$dNBR = (NBR_{pre} - NBR_{post}) \quad (2)$$

Un valor más alto de dNBR indica un daño más severo, mientras que las áreas con valores negativos de dNBR pueden indicar un nuevo crecimiento después de un incendio (ONU, s.f.).

### **2.1.6. Plataforma Google Earth Engine**

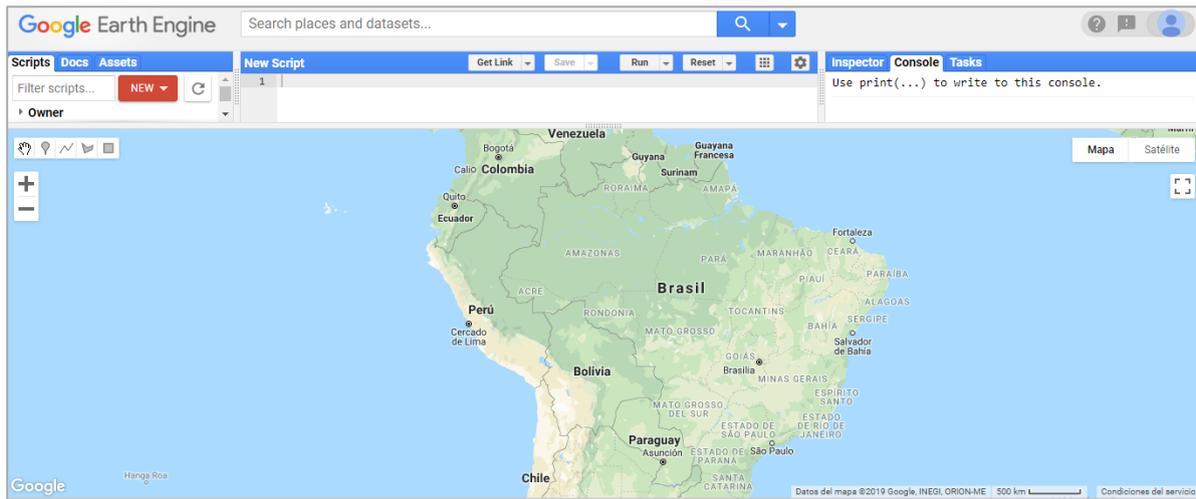
Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de geomática basada en la nube que permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes de satélite de nuestro planeta (Figura 10). Los científicos y las organizaciones sin ánimo de lucro utilizan GEE para llevar a cabo estudios de teledetección remota, predecir brotes de enfermedades, gestionar recursos naturales, etc. (Google Earth, s.f.).

La plataforma de análisis de datos geoespaciales de Google brinda acceso a un gran catálogo de datos de observación de la Tierra, algoritmos para analizar los datos y una interfaz de programación para crear y ejecutar algoritmos personalizados. Los cálculos en GEE se realizan utilizando la infraestructura de Google, y los análisis se comparan automáticamente para que muchos procesadores de computadoras puedan participar en cualquier cálculo dado.

El catálogo de datos de Earth Engine reúne petabytes (PB) de datos de observación de la Tierra, eliminando la necesidad de descargar y administrar datos localmente; típicamente una proporción significativa del trabajo involucrado en la realización de análisis geoespaciales a gran escala. El catálogo de datos contiene un conjunto casi completo de datos de los satélites Landsat 4, 5, 7 y 8 descargados del archivo USGS Earth Resources Observation and Science, conjuntos de datos satelitales MODIS, una serie de modelos digitales de elevación, datos atmosféricos, datos meteorológicos, y varios conjuntos de datos de cubierta terrestre global pre-clasificados. Earth Engine también pone a disposición muchos productos derivados; como mosaicos anuales y una variedad de índices ambientales, por ejemplo: NDVI, pendiente (Padarian et al., 2015, p. 81).

### **Figura 10**

*Plataforma Google Earth Engine*



Nota: Google Earth Engine. <https://code.earthengine.google.com/>.

### 2.1.7. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Se podría definir como herramientas informáticas, capaces de gestionar y analizar la información georreferenciada, con vistas a la resolución de problemas de base territorial y medioambiental. En primer lugar, se pondría énfasis en el carácter computarizado del tratamiento de la información. Se trataría, por tanto, de la realización de operaciones automáticas a través de los ordenadores. En segundo lugar, se dirige a la gestión, análisis y modelización de información geográfica, referida a información que se distingue por la existencia de una doble componente: temática y espacial (Santos, 2004, p. 2).

Un SIG se puede definir como aquel método o técnica de tratamiento de la información geográfica que nos permite combinar eficazmente información básica para obtener información derivada. Para ello, contaremos con componentes, tanto con las fuentes de información como con un conjunto de herramientas informáticas (hardware y software) que nos facilitarán esta tarea; todo ello enmarcado dentro de un proyecto que habrá sido definido por un conjunto de personas, y controlado, así mismo, por los técnicos responsables de su implantación y desarrollo. En definitiva, un SIG es una herramienta capaz de combinar información gráfica

(mapas) y alfanumérica (estadísticas) para obtener una información derivada sobre el espacio (Domínguez, 2000, p. 3).

## **2.2. Base Legal**

**Constitución Política del Perú de 1993.** En su Artículo 66. Recursos naturales. Los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación. El Estado es soberano en su aprovechamiento. Por ley orgánica se fijan las condiciones de su utilización y de su otorgamiento a particulares. La concesión otorga a su titular un derecho real, sujeto a dicha norma legal.

**Decreto Supremo N°012-2009-MINAM,** que aprueba la Política Nacional del Ambiente. En el Eje de Política 1. Conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y de la diversidad biológica, teniendo así lineamientos de política: Bosque: Inciso b) Prevenir la reducción y degradación de bosques y sus recursos, por prácticas ilegales como tala, quema, comercio y cambio de uso de la tierra. Mitigación y Adaptación al Cambio Climático: Inciso b) Establecer sistemas de monitoreo, alerta temprana y respuesta oportuna frente a los desastres naturales asociados al cambio climático, privilegiando a las poblaciones más vulnerables.

**Ley N°28611-2005,** Ley General del Ambiente, en su Artículo 92. De los recursos forestales y de fauna silvestre. El Estado establece una política forestal, propiciando el aprovechamiento sostenible de los recursos forestales y de fauna silvestre, así como la conservación de los bosques naturales, resaltando sin perjuicio de lo señalado, los principios de ordenamiento y zonificación de la superficie forestal nacional, el manejo de los recursos forestales, la seguridad jurídica en el otorgamiento de derechos y la lucha contra la tala y caza ilegal.

**Decreto Supremo N°009-2013-MINAGRI**, que aprueba la Política Nacional Forestal y Fauna Silvestre. En el Eje de Política 2. Sostenibilidad, teniendo como lineamiento: Lineamiento 1. Conservación, protección, mantenimiento, mejora y aprovechamiento sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre de la Nación, así como de las plantaciones forestales en predios privados y comunales, en el marco de un enfoque ecosistémico.

**Ley Forestal y de Fauna Silvestre N° 29763-2012 y sus Reglamentos.** Se presentan los siguientes artículos:

- En el artículo 24, menciona que el Plan Nacional Forestal y de Fauna Silvestre toma en cuenta las diferentes realidades sociales y ambientales y comprende los aspectos de forestación y reforestación; de prevención y control de la deforestación; de prevención y control de incendios forestales; de investigación forestal y de fauna silvestre; de prevención y lucha contra la tala ilegal y la captura, caza y comercio ilegal de fauna silvestre; entre otros.
- Según el Artículo 207 (207.3). Son infracciones muy graves las siguientes: en el inciso a) provocar incendios forestales, inciso b) realizar la quema de los recursos forestales que forman parte del Patrimonio.
- Según el Artículo 209.2. Sanción de multa, la sanción de multa por la comisión de las infracciones indicadas en el artículo 207 es: Inciso c) mayor a 10 hasta 5000 UIT por la comisión de infracción muy grave.

**Ley N° 27783-2001.** Ley de bases de la descentralización. En el Artículo 35. Competencias exclusivas de los Gobiernos Regionales. Inciso n) Promover el uso sostenible de los recursos forestales y de biodiversidad.

**Decreto Supremo N° 016-2012-AG.** Reglamento de Manejo de los Residuos Sólidos del Sector Agrario. En su artículo 27°, inciso 27.1 establece que está prohibido realizar la quema de restos vegetales de cultivos o cosechas.

**Decreto Legislativo N° 1237 -2015,** modifica el Código Penal aprobado por el Decreto Legislativo N° 635 en el año 1991. En el Artículo 310. Delitos contra los bosques o formaciones boscosas. Será reprimido con pena privativa de libertad no menor de cuatro años ni mayor de seis años y con prestación de servicios comunitarios de cuarenta a ochenta jornadas el que, sin contar con permiso, licencia, autorización o concesión otorgada por autoridad competente, destruye, quema, daña o tala, en todo o en parte, bosques u otras formaciones boscosas, sean naturales o plantaciones.

**Ordenanza Regional N° 092-2015-CR-GRC/CUSCO.** Se presentan los siguientes artículos:

- Artículo Tercero. Encárguese a la Oficina de Gestión de Riesgos y Seguridad del Gobierno Regional Cusco, la responsabilidad de velar por el cumplimiento de lo dispuesto en la presente Ordenanza Regional.
- Artículo Cuarto. Son funciones del Comité Técnico de Incendios Forestales de la región Cusco. A. Realizar el inventario de recursos humanos y materiales para la respuesta frente a incendios forestales; y, su correspondiente actualización. B. Gestionar recursos financieros ante las instancias pertinentes para la preparación y respuesta. C. Elaborar el Plan de Contingencia frente a incendios forestales en el ámbito de la región Cusco. D. Capacitar a los grupos de respuesta para la atención de los incendios forestales. E. Organizar la respuesta de las instituciones especializadas ante la ocurrencia de incendios forestales. F. Promover la conformación de Brigadas Institucionales y Comunes de respuesta ante incendios forestales.

**Ordenanza Regional N° 139-2018-CR/GRC.CUSCO.** Que modifica los artículos primero y segundo de la OR N° 092-2015-CR/GRC.CUSCO.

- Artículo Primero. CREAR el Comité técnico Regional de incendios forestales en la Región del Cusco, con la finalidad de organizar y dirigir la estimación, prevención y reducción del riesgo, además de las acciones de preparación, respuesta, rehabilitación y reconstrucción, en caso de los incendios forestales en la Región del Cusco, en función a los siguientes componentes: gestión prospectiva, gestión correctiva y gestión reactiva, formulando funciones detallados en la Ordenanza Regional.
- Artículo Segundo. El Comité estará conformado por representantes debidamente acreditados de las siguientes instituciones: 1. Oficina de Gestión de Riesgos y Seguridad del GRC, que lo preside. 2. Gerencia Regional de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente del GRC. 3. IX Comandancia del Cuerpo de Bomberos Voluntarios del Perú. 4. Servicio Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SERNANP). 5. Dirección Desconcentrada de INDECI Cusco (DDI-CUSCO). 6. Dirección Regional de Agricultura del GRC. 7. Departamento de Medio Ambiente – PNP. 8. 5ta Brigada de Montaña del Ejército del Perú. 9. Dirección Regional de Salud del GRC. 10. Dirección Desconcentrada de Cultura del Cusco, Ministerio de Cultura. 11. Servicio Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). 12. Dirección Regional de Educación del GRC. 13. Fiscalía de Prevención del Delito. 14. Fiscalía del Medio Ambiente. 15. Representantes de las Municipales Provinciales de la Región Cusco. 16. Representantes de las Municipales Distritales de la Región Cusco. 16. Organizaciones Sociales Representativas de la Región. 17. Organizaciones de la Sociedad Civil.

### III. MÉTODO

#### 3.1. Tipo de investigación

La presente investigación se caracteriza por ser cuantitativa, ya que “se recogen y analizan los datos a través de los conceptos y variables medibles” (Alain y Cortés, 2018, p. 69). De alcance descriptivo; porque “exhibe el conocimiento de la realidad tal como se presenta en una situación de espacio y de tiempo dado, aquí se observa y se registra, o se pregunta y se registra; también describe el fenómeno sin introducir modificaciones: tal cual” (Rojas, 2015, p. 7). También por ser transversal, debido a que recibe este nombre por ser un procedimiento de investigación sin continuidad en el eje del tiempo. Se puede estudiar la totalidad de una población, pero en esencia se estudia una muestra representativa de esta en un momento y lugar determinados (Cruz y Moreno, 2012).

#### 3.2. Ámbito temporal y espacial

##### 3.2.1. *Ámbito temporal*

La investigación se realizó en base a información recopilada de incendios forestales ocurridos a nivel nacional durante los años 2000 – 2021; analizando la distribución espacial y temporal de estos, el departamento de Cusco fue el más afectando durante ese periodo. Además, se evaluó el caso de un gran incendio ocurrido en el distrito de Coporaque, provincia del Espinar del año 2016.

##### 3.2.2. *Ámbito espacial*

La presente investigación se desarrolló en el departamento de Cusco.

#### 3.3. Variables

A continuación, en la Tabla 4, se presentan las variables dependiente e independiente junto con la dimensión, los indicadores e instrumentos.

**Tabla 4***Variables de estudio*

Variable Dependiente	Variable Independiente	Dimensiones		Indicadores	Instrumentos
		Aspectos	Campos		
Grado de Severidad de los incendios forestales aplicando índice de NBR y Sistemas de Información Geográfica	Incendios forestales en el departamento de Cusco	Variables físicas	Clima	Tipos de clima	Shapefile de SENAMHI
			Hidrografía	Unidad hidrográfica	Shapefile de ANA
			Geología	Unidad geológica	Shapefile de ZEE Gore Cusco
			Geomorfología	Unidad geomorfológica	Shapefile de ZEE Gore Cusco
		Variables biológicas	Suelos	Tipo de suelo	Shapefile de ZEE Gore Cusco
			Capacidad de uso mayor (CUM)	Tipo de CUM	Shapefile de ZEE Gore Cusco
			Cobertura vegetal	Tipo de cobertura vegetal	Shapefile de MINAM
			Ecosistemas	Tipo de ecosistema	Shapefile de MINAM

Distribución espacial y temporal de las ocurrencias de incendios	Análisis histórico de los incendios forestales	Número, Año y lugar de los incendios forestales	Shapefile de MINAM
Evaluación de la severidad de incendios	Gran incendio ocurrido en Coporaque	Valores del dNBR (-500 a +1300)	Plataforma de Google Earth Engine (GEE) y Arcgis Pro

---

*Nota.* Elaboración propia.

### **3.4. Población y muestra**

#### **3.4.1. Población**

En este tema de investigación la población será toda la extensión del departamento de Cusco. Es decir, de aproximadamente 7 198 650 Ha de superficie.

#### **3.4.2. Muestra**

La muestra fue del tipo “muestreo intencional - caso típico, donde se escoge un caso representativo de la población en estudio” (Corral et al., 2015). Es decir, está compuesta por la cicatriz del incendio forestal ocurrido en el año 2016 en el distrito de Coporaque, constituyendo así un total de 1 945.14 Ha, que fueron determinadas por medio del índice NBR.

### **3.5. Instrumentos**

#### **3.5.1. Material de escritorio**

Se desarrolló esta investigación utilizando los siguientes instrumentos:

- Laptop Lenovo Core i5: Equipo utilizado para la recopilación, sistematización y procesamiento de la información obtenida.
- Microsoft Word 2016: Utilizado en la elaboración del estudio de investigación.
- Microsoft Excel 2016: Usado para elaborar las tablas y gráficos de esta investigación.
- Disco externo (1 TB): Utilizado para el almacenamiento de la información alfanumérica y geoespacial.

#### **3.5.2. Material cartográfico**

- Cartografía digital: shapefile del Registro Histórico de incendios forestales, shapefile de límites políticos administrativos, capital departamental, provincial y distrital. Shapefile de red vial, red ferroviaria y red aeroportuaria, centros poblados,

clima, ríos, cuencas hidrográficas, geología, geomorfología, suelos, capacidad de uso mayor, cobertura vegetal y ecosistemas.

- Imágenes Landsat 8, nivel 1, con reflectancia superficial corregida atmosféricamente de los sensores OLI/TIRS (Landsat/LC08/C01/T1\_SR). Ver Anexo B para mayor detalle.

### **3.5.3. Software**

- Google Earth Engine (GEE): Plataforma de Geomática online de libre acceso, que permite visualizar, procesar y analizar imágenes satelitales para obtener la severidad de los incendios forestales.
- ArcGIS Pro 2.6.0: Software utilizado para analizar el registro histórico de los incendios forestales, realizar los mapas del presente estudio y materializar la evaluación de la severidad de incendios.
- Google Earth Pro: Plataforma utilizada para visualizar imágenes satelitales de alta resolución e imágenes históricas.

## **3.6. Procedimientos**

La presente investigación se realizó aplicando los siguientes procedimientos:

### **3.6.1. Etapa de recopilación de información**

Se realizó la recopilación de información de las diversas instituciones para cumplir con los objetivos planteados.

En relación a la recopilación de información de las variables físicas y biológicas del departamento de Cusco estas fueron descargadas de los Geoportales respectivos de las instituciones:

- Presidencia del Consejo de Ministros (PCM): La Secretaría de Gobierno Digital - SEGDI de la PCM administra la Infraestructura de datos Espaciales “GEOIDEP”,

donde se pueden encontrar un listado de geoportales de entidades públicas que difunden y brindan acceso a su información geográfica:

<https://www.geoidep.gob.pe/servicios-idep/geoportales>

Respecto a la recopilación de información de ocurrencia de incendios forestales, se recurrió a las siguientes instituciones:

- Ministerio del Ambiente: Dentro de la Plataforma del MINAM (Geoservidor), están los Servicios CFOI que afectan a los ecosistemas, en los cuales se encuentra el Registro Histórico georreferenciado de ocurrencias de incendios. Este registro a nivel nacional fue descargado en formato shapefile de puntos, teniendo en consideración data desde los años 2000 al 2021. A continuación, se muestra el link de la Plataforma del MINAM en mención:

<https://geoservidorperu.minam.gob.pe/geocfoi/minam/home/index>

- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR): Cuenta con una Plataforma donde se presentan alertas de incendios forestales de manera preventiva, dentro de los cuales se encuentran: alertas últimas 24 horas (focos de calor, alertado, confirmado y liquidado), alertas históricas y cicatrices de incendio. Sin embargo, esta información solo es de visualización, mas no se puede descargar. Por ese motivo, se solicitó información de incendios forestales a nivel histórico a la Dirección de Catastro y Zonificación, proporcionándonos información de estos eventos en formato shapefile de puntos y polígonos solo del año 2018. La Plataforma del SERFOR referente a incendios forestales es la siguiente:

<https://geo.serfor.gob.pe/monitoreosatelitalforestal/incendios.html>

- Gobierno Regional Cusco: Se solicitó información de incendios forestales a la Gerencia Regional de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente, en el cual manifestaron que no cuentan con información histórica de incendios forestales,

recién a partir del año 2019 en el Centro de Operaciones de Emergencia Regional (COER) se ha habilitado un área que concentre la información sobre los incendios forestales reportados en la región y un estimado del área quemada. Y cuentan con diversas entidades con capacidad para la respuesta en caso de incendios forestales.

- Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación (SINPAD): La Plataforma del SINPAD del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) contiene reportes de emergencia a peligros: incendios forestales, incendios urbanos, lluvias intensas, deslizamiento, entre otros. Esta Plataforma se usó para la obtención de información adicional al del Ministerio del Ambiente, verificando las hectáreas aproximadas de algunos incendios y de los daños que trajeron consigo. Cabe resaltar que esta información fue obtenida de la Plataforma SINPAD versión antigua y tenía información de emergencias desde el año 2000 al 2019, porque la versión actual v2.0 solo tiene información desde el año 2019.

Respecto a la información para estimar los niveles de severidad de incendios:

- ONU - SPIDER: Se recurrió a la Plataforma de las Naciones Unidas (ONU-SPIDER) donde te brindan algunas prácticas recomendadas para la gestión de desastres y la respuesta de emergencia, en este caso el mapeo de la severidad de incendios forestales con el índice NBR. El link con la información respectiva es el siguiente:

<https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices>

### **3.6.2. Etapa de sistematización de información**

La sistematización de la información recopilada se hizo con el software ArcGIS Pro para los 3 objetivos planteados. Teniendo así ordenados todos los shapefile de las variables físicas y biológicas a utilizar. Respecto a los incendios forestales a nivel nacional y del departamento de Cusco, se determinó que la información a utilizar sería de las fuentes del

Ministerio del Ambiente y el SINPAD. Además, con ello se pudo seleccionar la muestra adecuada para realizar la aplicación del índice NBR en la Plataforma Google Earth Engine.

### ***3.6.3. Etapa final***

Se realizaron los mapas del diagnóstico de variables físicas y biológicas del departamento de Cusco, que en total fueron 8. Asimismo, se representó a través de gráficos y tablas la distribución espacial y temporal de la ocurrencia de los incendios forestales a nivel nacional y del departamento de Cusco, para conocer qué departamentos a nivel nacional, provincias y distritos presentan mayores ocurrencias de incendios a nivel histórico. Posteriormente, el mapa de la severidad de un gran incendio del año 2016 en el departamento de Cusco.

## **3.7. Análisis de datos**

### ***3.7.1. Análisis de las variables físicas y biológicas del departamento de Cusco***

Se analizaron las variables físicas y biológicas del departamento de Cusco, considerando 6 variables físicas: clima, hidrografía, geología, geomorfología, suelos y CUM. Respecto a las variables biológicas: cobertura vegetal y ecosistemas. Esto se realizó con la finalidad de caracterizar el departamento y conocer los tipos y/o clasificaciones de cada variable con cartografía base de las instituciones como INEI, IGN, ANA, Gore Cusco y MINAM, con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica.

### ***3.7.2. Análisis de la distribución espacial y temporal de los incendios forestales***

El análisis de los incendios forestales a nivel nacional se realizó con el software ArcGIS Pro y Excel, estos incendios datan desde el año 2000 al 2021. Se seleccionó el departamento de Cusco por ser uno de los más afectados por estos incendios a nivel nacional. Para materializar la información histórica de los incendios, de formato shapefile (puntos) se pasó a formato Excel y con la ayuda de Tablas dinámicas se determinó la incidencia de los incendios forestales a nivel nacional y del departamento de Cusco; asimismo, se analizó esta distribución

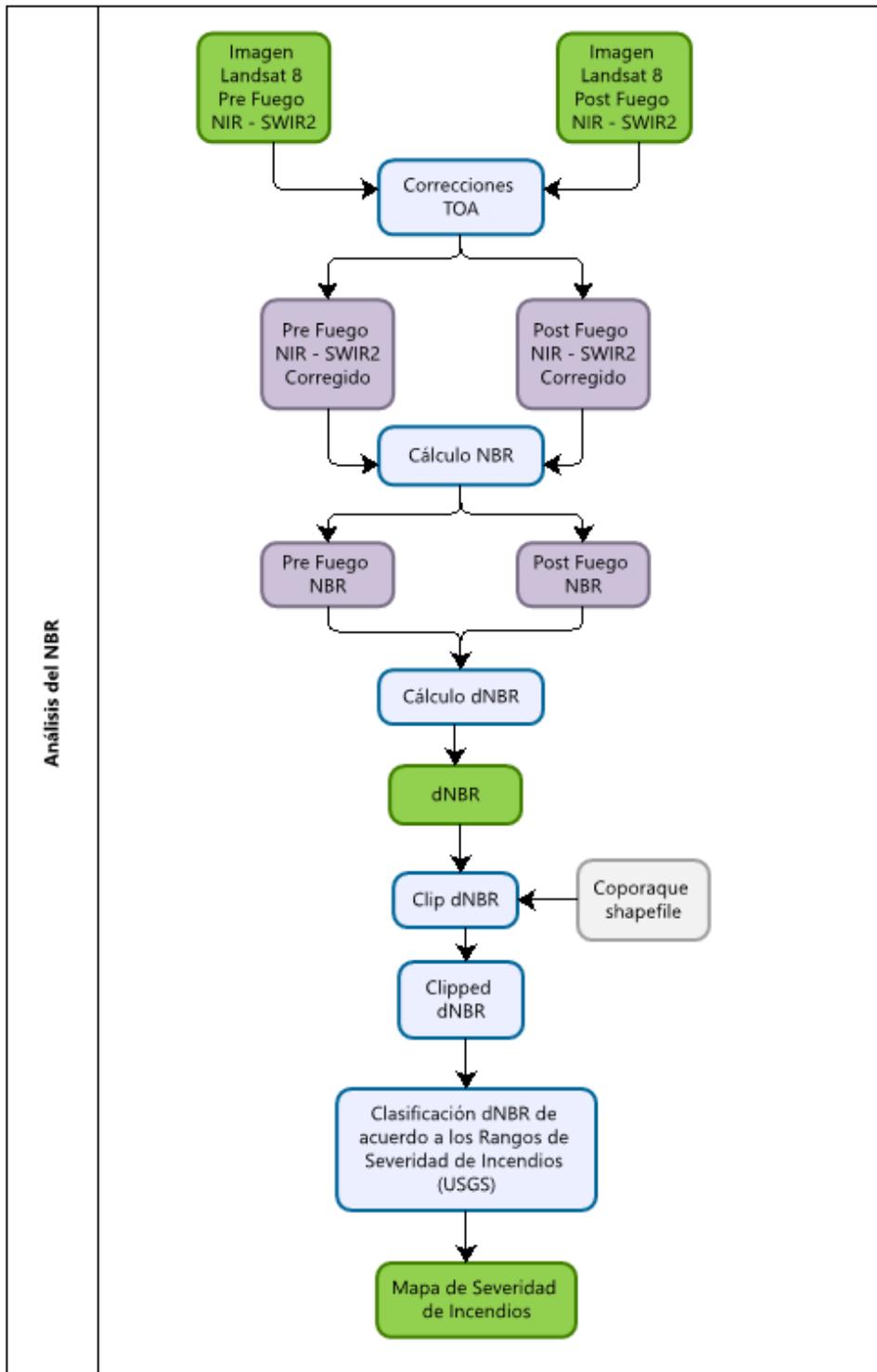
a nivel anual y mensual dando como resultado los años y meses más afectados por estos eventos en nuestro territorio.

### **3.7.3. Análisis del Índice Normalizado de Área Quemada (NBR)**

El índice especializado NBR (índice Normalizado de Área Quemada), se aplica en imágenes antes y después de un incendio para calcular su valor diferencial (dNBR), conocida como severidad de incendios. Esta práctica la recomienda las Naciones Unidas (ONU-SPIDER) para evaluar grandes áreas que han sido afectadas por incendios forestales. Este punto se realizó en el Code Editor de la Plataforma Google Earth Engine con la ayuda del script base de las Naciones Unidas, aplicándose para un gran incendio ocurrido en el departamento de Cusco en el año 2016. Por ejemplo, se sabe por la información del SINPAD - INDECI que hubo un gran incendio el 07 de agosto del año 2016 en el distrito de Coporaque, provincia de Espinar. Como primer paso, se localizó el evento (selección del área de estudio); se añadió un shapefile del distrito de Coporaque (formato polígono), para poder visualizar más rápido el incendio. Luego, se configuró un intervalo de tiempo, seleccionando las mejores imágenes satelitales Landsat pre y post incendio en un periodo determinado. Los intervalos de fechas fueron, de inicio (2016-07-20) y fin (2016-08-06) de un periodo antes del incendio (pre-fuego), por otro lado, el intervalo de fechas de inicio (2016-08-07) y fin (2016-08-18) de un periodo después del incendio (post fuego). Después, en el script se colocó la plataforma a trabajar, en este caso Landsat 8 y se procedió a “correr” el script para obtener una imagen ráster de la severidad de este incendio forestal, luego se guardó y descargó el ráster. En el software Arcgis Pro se cortó el ráster de acuerdo al área de estudio y finalmente se clasificó la dNBR de acuerdo a los colores sugeridos por la USGS. En la Figura 11 podemos observar lo descrito.

### **Figura 11**

*Esquema explicativo – Severidad de incendios*



Nota: Adaptada de *Diagrama de flujo*, por ONU-SPIDER, <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices>.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Ubicación del área de estudio

#### 4.1.1. Ubicación geográfica

El departamento de Cusco está ubicado en la región sur oriental del Perú, tiene una extensión territorial de 71 986.5 km<sup>2</sup> que representa el 5.6 % de la superficie del territorio nacional. Su posición geográfica está comprendida entre las coordenadas: Paralelo 11°10'00'' y 15°18'00'' Latitud sur, Meridiano 70°25'00'' y 73°58'00'' longitud oeste. El territorio está dominado por la Cordillera Oriental y Central de los Andes, cuyo punto más alto es el nevado Ausangate a 6372 m s.n.m. (Gobierno Regional de Cusco [Gore Cusco] 2016, p. 25).

#### 4.1.2. Ubicación política

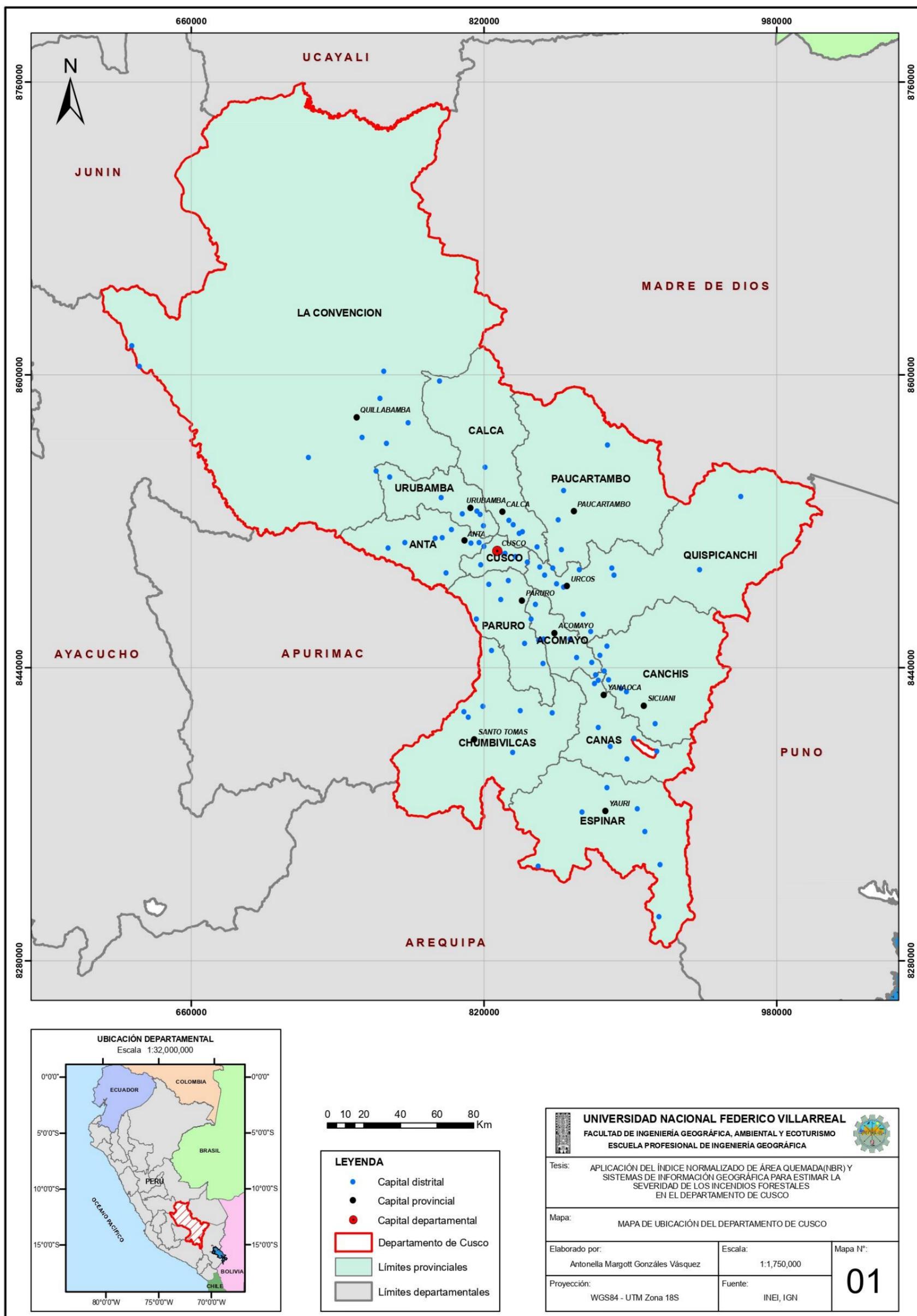
##### 4.1.2.1. Límites políticos.

- Por el norte: con los departamentos de Junín y Ucayali.
- Por el sur: con los departamentos de Arequipa y Puno.
- Por el este: con el departamento de Madre de Dios.
- Por el oeste: con los departamentos de Ayacucho y Apurímac.

**4.1.2.2. División política administrativa.** Cusco comprende 13 provincias: Acomayo, Anta, Calca, Canas, Canchis, Cusco, Chumbivilcas, Espinar, La Convención, Paruro, Paucartambo, Quispicanchi y Urubamba, y 112 distritos (Gore Cusco, 2016, p. 25). En la Figura 12 se aprecia la ubicación geográfica y política de Cusco.

Figura 12

Mapa de ubicación del departamento de Cusco

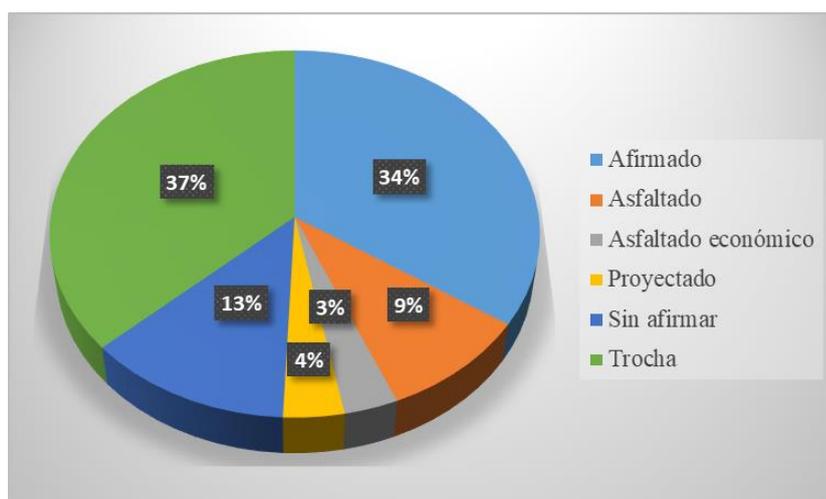


### 4.1.3. Accesibilidad

El departamento de Cusco cuenta con accesibilidad por medio de diferentes infraestructuras de transporte. La red vial del departamento, comprende 17,716.41 km en total; de los cuales el 14% son vías nacionales, el 17% son vías departamentales y el 69% son vías vecinales o locales. De acuerdo a la Figura 13, respecto al estado de las vías: el 9% se encuentran asfaltadas, el 34% están afirmadas, un 3% cuentan con asfaltado económico (solo vía nacional), un 4% son vías proyectadas, un 13% sin afirmar y 37% a nivel de trocha carrozable. Se puede decir que el 38% se encuentran en mal estado, un 29% en estado bueno, el 21% en estado regular y 12% de vías con información no disponible.

**Figura 13**

*Estado de la red vial, Cusco*



*Nota.* Elaboración propia.

La red aeroportuaria de Cusco cuenta con el Aeropuerto Teniente FAP Alejandro Velasco Astete. Además, con 2 aeródromos públicos y 3 privados, y con 22 helipuertos privados<sup>1</sup>. Respecto al transporte ferroviario, cuenta con 459 km de línea férrea en dos rutas: 338 km tramo Cusco – Juliaca y 121 km tramo Cusco – Hidroeléctrica. El tráfico de pasajeros

<sup>1</sup> Información .shp descargada y analizada del MTC, 2018, <https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html>

en esta última ruta fue de 2 454,085 pasajeros en el año 2015 (Gore Cusco, 2016, p. 29). En la Figura 14 se aprecia el Mapa de accesibilidad.

## **4.2. Diagnóstico de variables físicas y biológicas del departamento de Cusco**

### **4.2.1. Clima**

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2021) el departamento en estudio presenta 16 tipos de clima (Figura 15), de los 38 que posee el Perú. El clima más extenso se ubica en la serranía, el cual es lluvioso con deficiencia de humedad en otoño e invierno, y es templado, B(o,i)C'. Al lado oeste (frontera con Apurímac) y sobre los 4200 m s. n. m., se tiene un clima semiseco, templado y con invierno seco, C(i)B'. En la parte central del departamento (valle del río Urubamba), predominan los climas semiseco, templado, C(o,i)B', y frío, C(o,i)C', con deficiencia de humedad en otoño e invierno; y el clima lluvioso con otoño e invierno secos, templado, B(o,i) B'. La sequedad se debe a la influencia de la cordillera Oriental de los Andes, que bloquea el ingreso de humedad proveniente de la Amazonía, y a la brisa de valle – montaña. Las provincias de Quispicanchi y Canchis, entre los 4 000 a 5 000 m s. n. m., presentan los climas muy lluvioso y frío, con humedad en todas las estaciones del año, A(r)C', y el clima muy lluvioso, semifrío y con humedad abundante todo el año, A(r)D'. Sobre los 5 000 m s. n. m., se tiene un clima glacial, con hielo perenne y temperaturas muy bajas. En la Selva alta de las provincias de Quispicanchi y Paucartambo, y en la provincia de La Convención, los climas son los más lluviosos y húmedos del Perú, A(r) B', B(r)B', B(i)B', B(r)C', C(r)B' y A(r)A'. Es el caso de localidad de Quincemil con el tipo de clima A(r)B', provincia de Quispicanchi, donde precipita alrededor de 6 914 mm anuales. Por otro lado, ocupando menor área y sobre las provincias de Espinar y pequeñas áreas de Chumbivilcas y Sicuani, se tienen los climas lluviosos y fríos, con invierno seco, B(i)C' y el clima lluvioso con humedad todo el año y semifrío, B(r)D' (p. 54).

Figura 14

Mapa de accesibilidad del departamento de Cusco

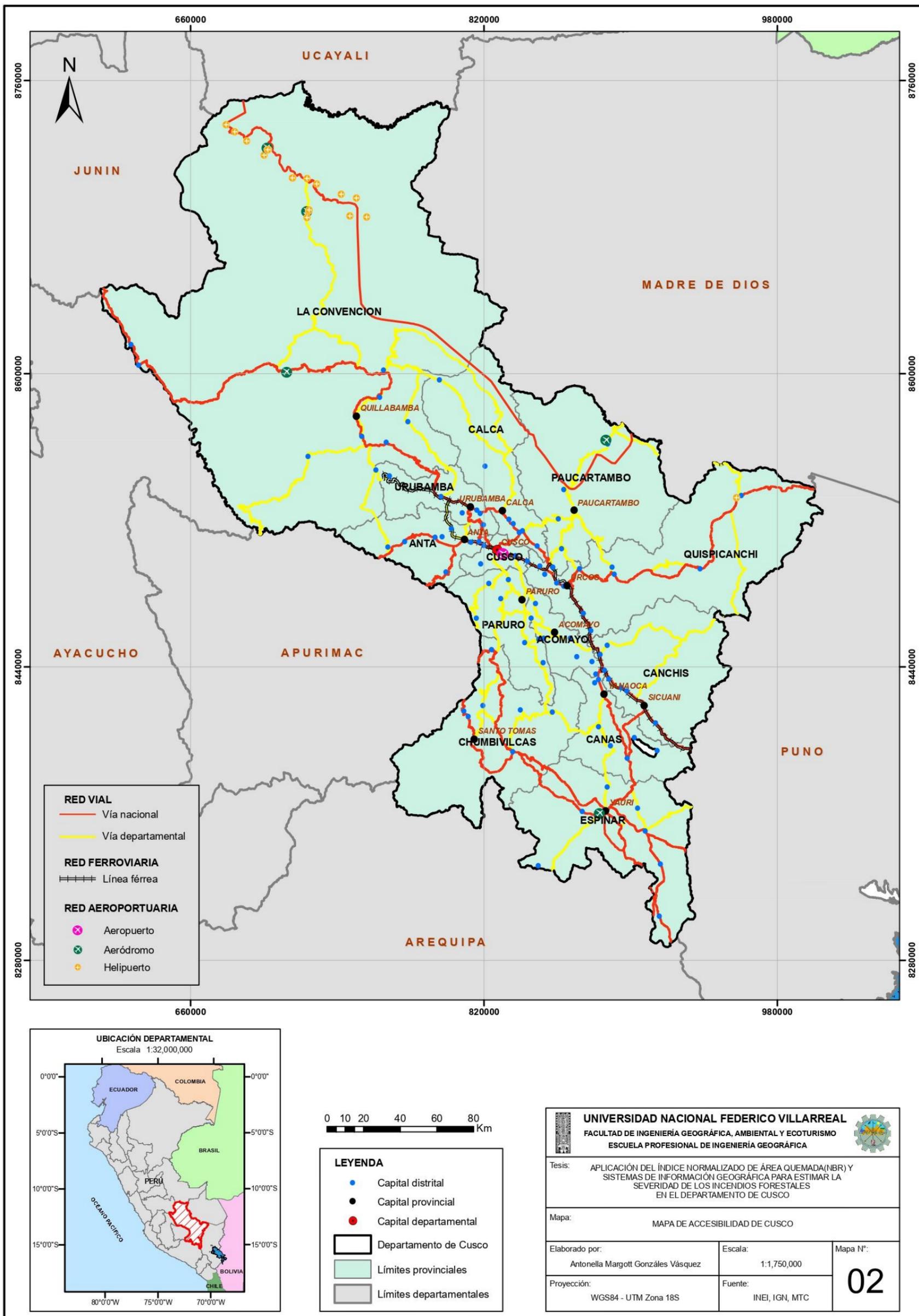
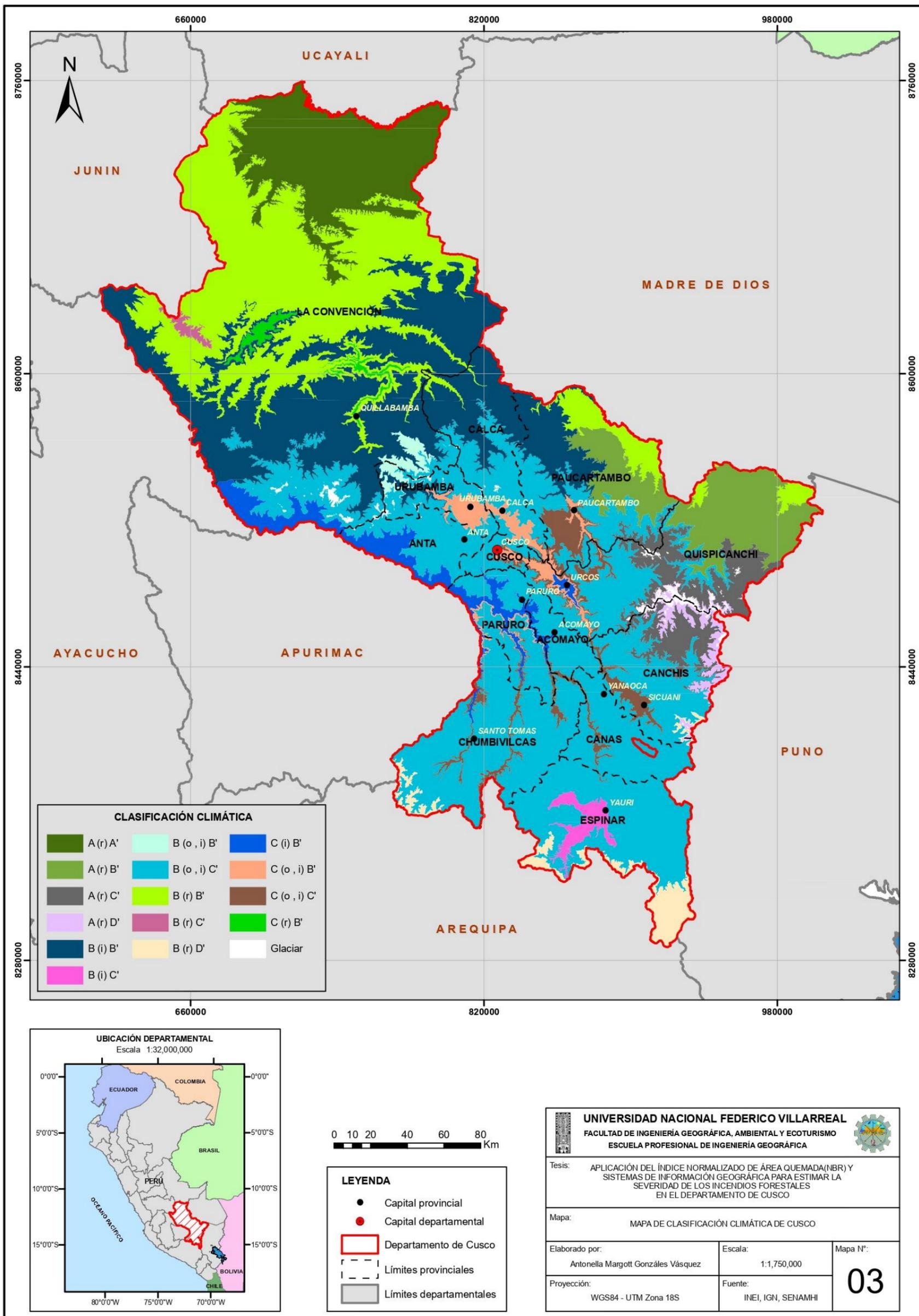


Figura 15

Mapa de Climas del departamento de Cusco



#### **4.2.2. Hidrografía**

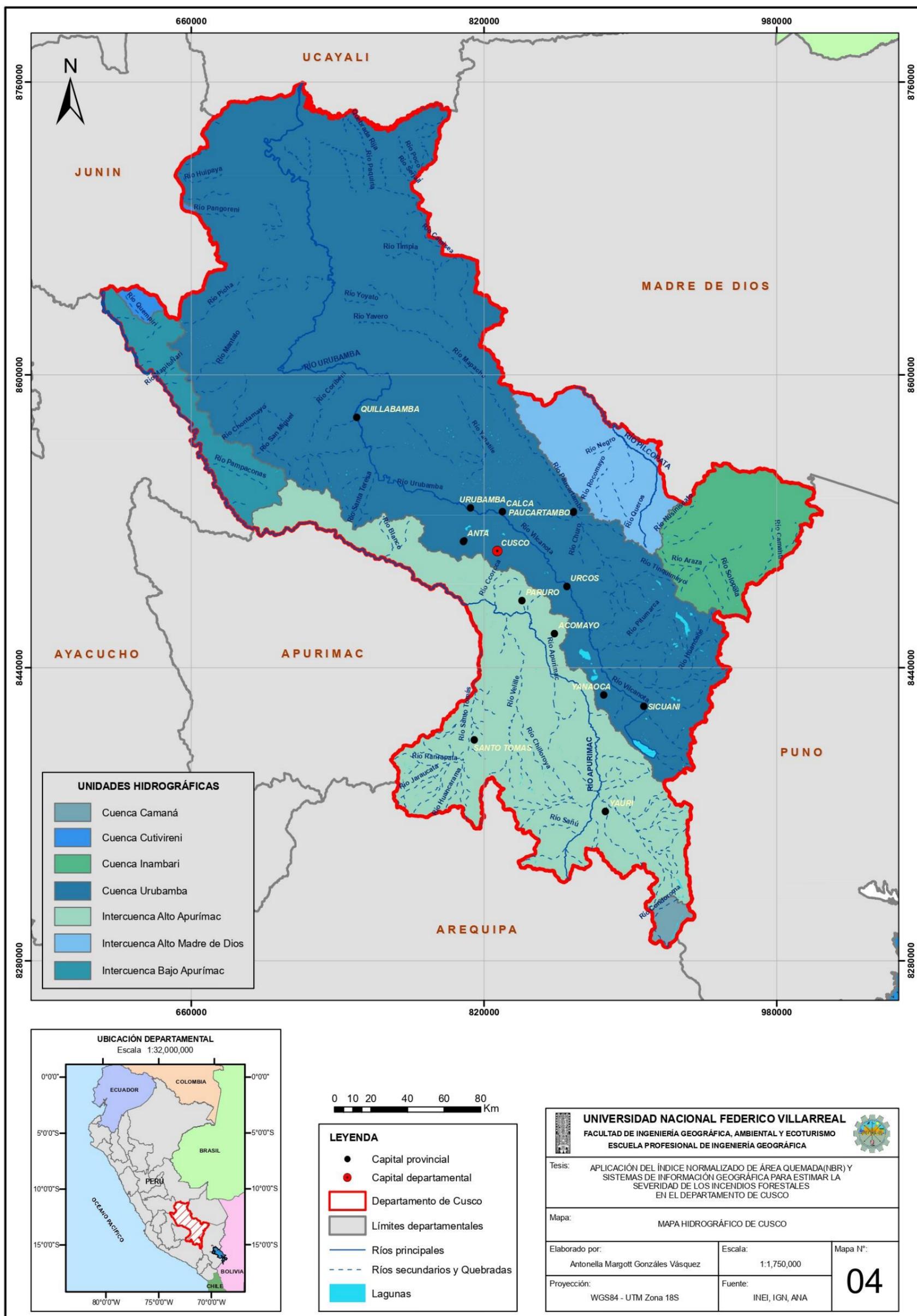
**4.2.2.1. Unidades hidrográficas.** Cusco, presenta 7 unidades hidrográficas, entre ellas tenemos: Cuenca Urubamba, intercuenca Alto Apurímac, cuenca Inambari, intercuenca Alto Madre de Dios, intercuenca Bajo Apurímac, cuenca Camaná y cuenca Cutivireni (ver Figura 16). De los cuales, la cuenca Urubamba es la que presenta mayor extensión con 43 560 km<sup>2</sup> aproximadamente (60% del total), la que le sigue es la intercuenca Alto Apurímac con un área de 16 440 km<sup>2</sup> (23% del total).

**4.2.2.2. Ríos.** La gran fuente hidrográfica es el río Vilcanota, que nace en el macizo del mismo nombre, el cual es tributario del sistema fluvial del Amazonas y orienta la dinámica económica de los diferentes pueblos de la región. Por la margen derecha, el Urubamba, nombre que adopta desde la localidad de Yucay- recibe la afluencia de numerosos ríos, entre ellos el Paucartambo, el Masisea, el Yanatile. Asimismo, el río Urubamba es el que forma el gran valle conocido por el de La Convención. El sistema de valles de La Convención comprende 23 afluentes que forman doce grandes valles y otras tantas quebradas entre los que deben mencionarse los de Lares, Lacco, Accobamba, y otros, formando un conjunto de unidades geográficas que tienen climas templados y cálidos. El río Apurímac, sirve de límite al Cusco con el departamento del mismo nombre (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 1996).

**4.2.2.3. Lagunas.** Son tres las lagunas que sobresalen en el territorio cusqueño, todas ubicadas en la cuenca del río Urubamba: la laguna de Sibinacocha ubicada en el distrito de Checacupe (provincia de Canchis), en la subcuenca Salcca; la de Pomacanchi ubicada en el distrito del mismo nombre (provincia de Acomayo), en la subcuenca Cerrada y la laguna de Langui-Layo ubicada en el distrito de Langui (provincia de Canas), en la subcuenca Hercca, todas estas lagunas pertenecen a la vertiente del Atlántico y están ubicadas por encima de los 3650 m.s.n.m (INEI, 1996).

Figura 16

Mapa Hidrográfico del departamento de Cusco



### 4.2.3. Geología

La historia y características geológicas del departamento, está sujeta a la evolución de los Andes, la cual se inicia en el paleozoico, continuando en el mesozoico y adquiere su forma definitiva en el cenozoico, prolongándose hasta la actualidad (Gore Cusco, 2005, p. 32).

Durante aproximadamente 80 a 60 millones de años, en Cusco se han producido una serie de movimientos terrestres que se evidencia principalmente por abundantes fallas recientes, plegamientos y otras acciones tectónicas que indican la constante actividad geológica de su territorio. Durante todo este periodo de tiempo, se han producido una serie de periodos geológicos en los cuales ocurren diversas fases de deposición y metamorfismo, y que en la actualidad se pueden observar con afloramientos de rocas que vienen desde el precambriano hasta depósitos recientes del cuaternario. Litológicamente, el ámbito de estudio consta de rocas paleozoicas que pasan gradualmente de la cordillera hacia faja subandina donde el mayor predominio lo conforman rocas del paleozoico e intrusivos granitoides que afloran cerca del 11 % de la superficie regional (ver Tabla 5), en tanto que rocas terciarias ocupan las partes mesoandinas del relieve terrestre regional, por otro lado, la selva baja básicamente está constituida por suelos cretáceos y cuaternarios (Gore Cusco, 2005, p. 33). En la Figura 17 se puede observar las unidades geológicas.

**Tabla 5**

#### *Unidades geológicas*

<b>Unidad Geológica</b>	<b>km<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>Unidad Geológica</b>	<b>km<sup>2</sup></b>	<b>%</b>
Capas Rojas	1687.18	2.38	Grupo Ambo	1584.74	2.23
Complejos metamórficos	926.34	1.31	Grupo Barroso	2432.77	3.43
Cretácicas inferior medio	516.1	0.73	Grupo Copacabana	1629.18	2.30
Cuarcitas del Cambrico	185.67	0.26	Grupo Maure	90.99	0.13
Dptos. aluvial, fluviales	1622.7	2.29	Grupo Mitu	1883.51	2.65
Dptos. coluviales,eluviales,aluv	1909.15	2.69	Grupo Oriente	293.79	0.41
Dptos. morrénicos,fluvioglaciares	2588.36	3.65	Grupo Puno	1826.07	2.57
Fm. Paucartambo, Quillabamb, Cab	6805.92	9.59	Grupo San José	7221.53	10.17
Formación Ananea	990	1.39	Grupo San José-Sandia	750.35	1.06

Formación Quenamari	170.04	0.24	Grupo tacaza y formación Alfaba	3385.43	4.77
Formación Cancao	101.48	0.14	Grupo Tarma	249.65	0.35
Formación Casablanca	333.37	0.47	Grupo Tarma Copacabana	173.17	0.24
Formación Chambira	1211.75	1.71	Grupo Yura	149.18	0.21
Formación Chincheros	29.97	0.04	Intrusiones andesíticos terciari	101.26	0.14
Formación Chonta Vivian	328.07	0.46	Intrusiones Devonianas de microd	267.81	0.38
Formación Garsa	234.67	0.33	Intrusivos Cuarzo microdiorita,	454.1	0.64
Formación Ipururo	4424.47	6.23	Intrusivos granodiorita y diorit	75.03	0.11
Formacion La Merced	4.55	0.01	Intrusivos permotriasicos de gra	7760.69	10.93
Formación Pisquicocha	294.2	0.41	Micaesquistos del Cámbrico	545.76	0.77
Formación río Picha	1234.41	1.74	Nevados	1241.35	1.75
Formación San Sebastian	206.65	0.29	Ortogneis del Cámbrico	384.87	0.54
Formación Sandia	5391.15	7.60	Precambiano	44.84	0.06
Formación Ucayali	167.81	0.24	Travertino	39.4	0.06
Formación Yahuarango	839.89	1.18	Unidades del Cretáceo inferior	3204.58	4.51
Formación Yauri	1081.78	1.52	Volcánico Quimsachata	9.37	0.01
Formación. Ollantaytambo	112.74	0.16	Volcanico Rumicolca	26.28	0.04
Formación. Río Tambo	332.3	0.47	Volcánico Santo Tomás	45.97	0.06
Gneis y Anfibolitas del Cámbrico	1377.73	1.94			
<b>TOTAL</b>				<b>70980.12</b>	<b>100.00</b>

*Nota.* Adaptada de *Geología*, por Gobierno Regional del Cusco, 2005, Zonificación Ecológica Económica – Departamento de Cusco.

#### 4.2.4. Geomorfología

El origen y las características de la forma de relieve del departamento de Cusco se debe a diversos episodios de modelamiento tectónico del levantamiento de la cadena de los Andes, así como también a procesos erosivos originando las diversas formas de paisajes conformando así la geomorfología actual de su territorio. En general, presenta cuatro grandes unidades fisiográficas: la cordillera occidental, cordillera oriental, faja subandina y llano amazónico, que en conjunto dan un matiz complejo al relieve, por lo que se puede observar planicies aluviales, altiplanicies, colinas y montañas tropicales a sub-tropicales. La presencia de diversos pisos altitudinales, fuertes pendientes, desniveles y formaciones geológicas heterogéneas, también determinan la concurrencia de variados y complejos patrones geomórficos en distancias muy cortas aunándose a ello la historia morfogenética la cual atravesó diversos episodios geológicos basados en el levantamiento de tipo tectónico de la cordillera occidental, oriental y la faja sub-

andina, lo que trajeron consigo la profunda disección de los valles maduros de los ríos Mapacho, Vilcanota y Apurímac (Gore Cusco, 2005, p. 23).

El relieve montañoso y abrupto de la región se demuestra en el hecho que el 32 % de la superficie está constituida por vertientes de montaña empinada (ver Tabla 6), con pendientes entre 25 – 50 %, otro importante porcentaje del territorio presenta condiciones aún más abruptas, el 29 % constituye vertientes de montaña disectada empinada a escarpada con pendientes superiores al 50 %. Si esto se contrasta con el porcentaje de áreas de relieve plano, apenas constituye el 18 % de la superficie del departamento (Gore Cusco, 2005, p. 24). En la Figura 18 se puede observar las unidades geomorfológicas de Cusco.

**Tabla 6**

*Unidades geomorfológicas*

<b>Paisaje</b>	<b>Descripción</b>	<b>km<sup>2</sup></b>	<b>%</b>
Altiplanicie	Altiplanicies allanadas	885.02	1.2
	Altiplanicies disectadas	5420.4	7.6
	Altiplanicies onduladas	5061.29	7.1
	Fondos de valle aluvial altiplánico	324.31	0.5
	Fondos de valle aluvial montañoso	947.58	1.3
	Fondos de valle glaciar y aluvial	1111.11	1.6
	Llanura de valle aluvial	91.49	0.1
Colinoso	Colinas altas fuertemente disectadas	2592.31	3.7
	Colinas altas moderadamente disectadas	1238.75	1.7
	Colinas bajas fuertemente disectadas	1354.04	1.9
	Colinas bajas moderadamente disectadas	2472.95	3.5
Llanura amazónica	Terrazas altas disectadas	190.26	0.3
	Terrazas altas sin disección	530.93	0.7
	Terrazas bajas	499.8	0.7
	Terrazas medias disectadas	234.4	0.3
Montañoso	Terrazas medias sin disección	656.57	0.9
	Vertientes de montaña allanada	4367.19	6.2
	Vertientes de montaña disectada empinada a escarpada	20491.29	28.9
	Vertientes de montaña empinada	22510.28	31.7
<b>Total</b>		<b>70979.97</b>	<b>100</b>

*Nota.* Adaptada de *Unidades geomorfológicas*, por Gobierno Regional del Cusco, 2005, Zonificación Ecológica Económica – Departamento de Cusco.

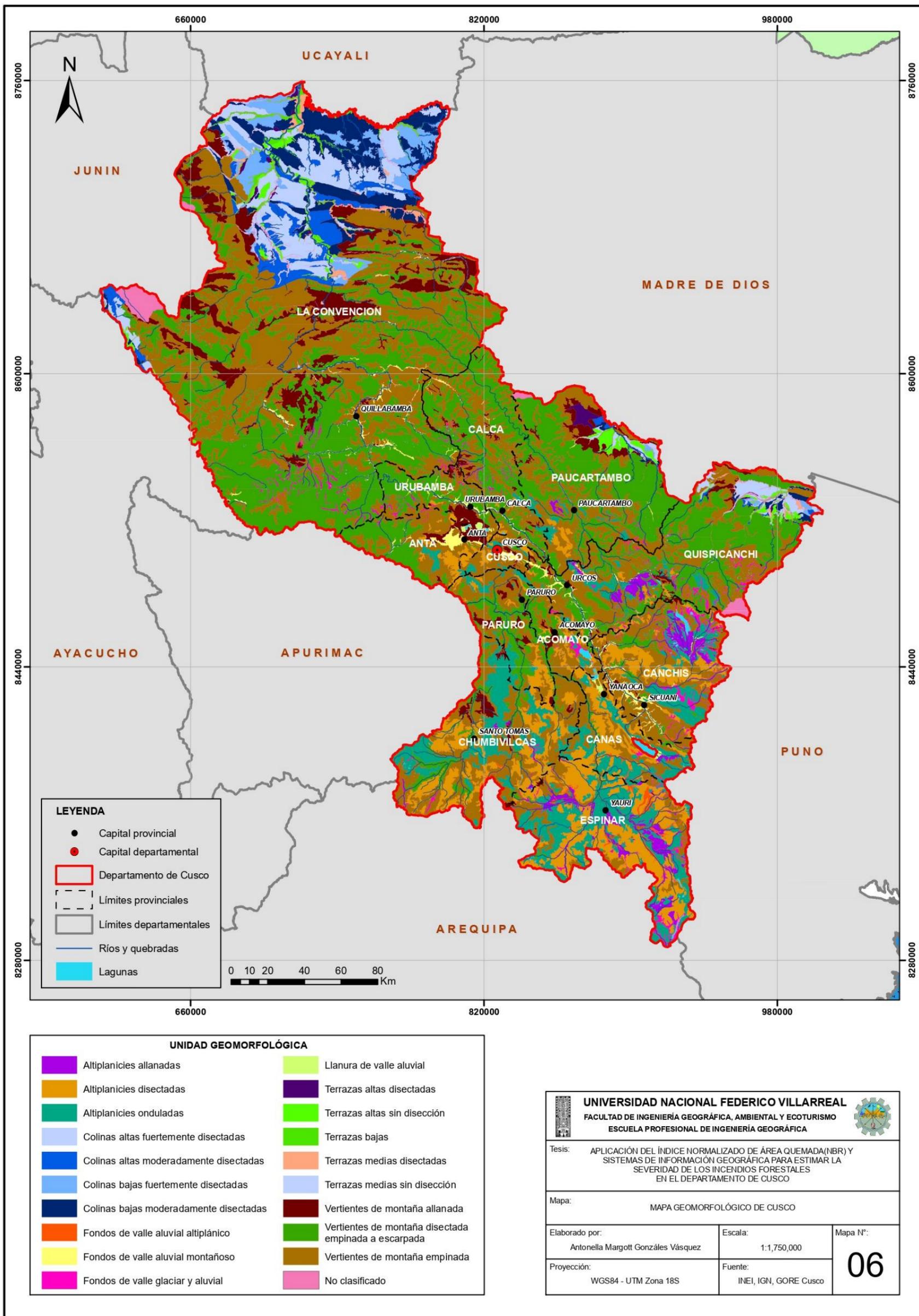
Figura 17

Mapa de geología del departamento de Cusco



Figura 18

Mapa de geomorfología del departamento de Cusco



#### 4.2.5. Suelos

Los suelos constituyen la capa superficial natural de la corteza terrestre regional, compuesta por elementos orgánicos e inorgánicos (minerales) aislados o mezclados en mayor o menor proporción. En el ámbito de estudio se identifican “Grandes Grupos de Suelos”, de acuerdo a la clasificación sugerida por la FAO y representado por unidades cartográficas adoptando a nombres locales, los cuales se pueden ver en la Figura 19 (Gore Cusco, 2005, p. 52). De acuerdo a la Tabla 7, los tipos de suelos predominante en Cusco son: Maingo Misceláneo con un 26%, después está Pomacanchis con un 20% y Saniriato con un 11%.

**Tabla 7**

#### *Clasificación de suelos*

SUELO	SIMBOLOGÍA	CLASIFICACIÓN FAO	KM <sup>2</sup>	%
Apurímac Mollepata	APU-M	REGOSOL	964.24	1.36
Catca	CAT	REGOSOL FLUVISOL	1068.15	1.50
Cheni Sepahua	CHE-SE	FLUVISOL CAMBISOL	1689.88	2.38
Cuyo Misceláneo	CU-MI	REGOSOL	6227.81	8.77
Echarati Pachiri	E-PA	GLEYSOL CAMBISOL	416.39	0.59
Langui Yauri	LA-YA	REGOSOL FLUVISOL PARAMOSOL	1138.95	1.60
Mahuayani	MA	PHAEZEM	846.44	1.19
Maingo Misceláneo	MA-MI	REGOSOL CAMBISOL	18475.52	26.03
Mendozayoc Villa Florida	ME-VI	GLEYSOL CAMBISOL	3015.26	4.25
Misceláneo	MIS		2539.25	3.58
Pomacanchis	POM	REGOSOL PARAMOSOL	14492.67	20.42
Queros Quincemil	QUE-QUI	FLUVISOL	788.67	1.11
Saniriato	SA	REGOSOL	7504.66	10.57
Sepahua	SE	CAMBISOL	5345.69	7.53
Sicuani Tinta	SI-TI	FLUVISOL PHAEZEM	182.8	0.26
Vilcabamba Coline	VIL-CO	REGOSOL	6035.61	8.50
Vilcanota Challabamba	VIL-CHA	FLUVISOL CAMBISOL	247.98	0.35
<b>TOTAL</b>			<b>70979.97</b>	<b>100.00</b>

*Nota.* Adaptada de *Clasificación de suelos de la Región*, por Gobierno Regional del Cusco, 2005, Zonificación Ecológica Económica – Departamento de Cusco.

Las características de los suelos preponderantes en Cusco se muestran a continuación:

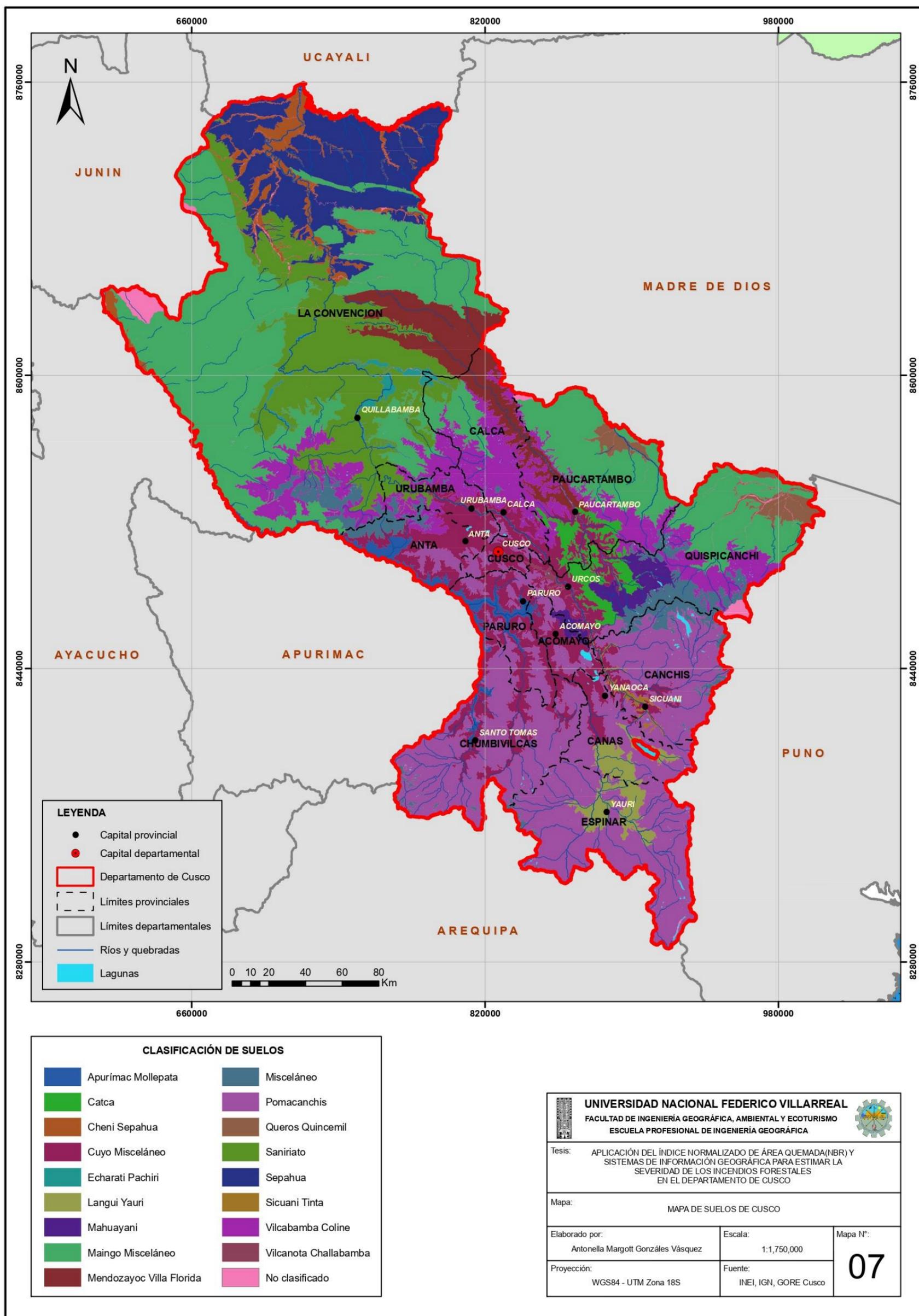
**4.2.5.1. Maingo misceláneo (MA-MI).** Presentan en su composición materiales a base de areniscas con micas de muscovita, sucesión de pizarras y areniscas intercaladas con lutitas y calizas, con perfil AC con epipedón ócrico sin horizonte sub superficial a cámbico, los suelos presentan desarrollo genético de superficiales a moderadamente profundos, una textura moderadamente gruesa a fina, sus colores característicos son de pardo, pardo fuerte a pardo amarillento y oscuro, siendo en otros sitios rojo amarillento; presentan buen drenaje a algo excesivo (Gore Cusco, 2005, p. 56).

**4.2.5.2. Pomacanchi (POM).** Se caracterizan por ser originados a partir de tobas areniscosas y conglomerados lenticulares con clastos volcánicos; horizontes de areniscas, arcillas y limos; tufos intercalados con diatomitas impuras. Estos suelos se caracterizan porque no presentan desarrollo genético representativo, son suelos moderadamente profundos a muy superficiales, con material residual a partir de areniscas rojas, conglomerados, basalto, arcosa roja, cuarcitas, lutitas yesíferas y lutitas oscuras intercaladas con calizas claras silíceas. El perfil es el tipo AC y epipedon ócrico (hístico) sin horizonte sub superficial de diagnóstico a cámbico; su textura es de moderadamente gruesa a moderadamente fina, los colores varían de pardo a pardo amarillento y pardo rojizo oscuro, y en otros sitios pardo grisáceo muy oscuro a pardo rojizo. Estos suelos presentan un drenaje algo excesivo a bueno (Gore Cusco, 2005, p. 63).

**4.2.5.3. Saniriato (SA).** Son originados a partir de materiales intrusivos de composición granitoide y rocas sedimentarias de composición conglomerádica con clastos de areniscas, cuarcitas, limolitas silicificadas y calizas, presentan perfiles sin desarrollo genético con perfil AC y epipedón ócrico sin horizonte sub superficial, la profundidad efectiva es de superficial a moderadamente profundo, la coloración de los suelos varía entre pardo a pardo rojizo. Presentan una textura media a fina, con drenaje natural bueno a algo excesivo (Gore Cusco, 2005, p. 55).

Figura 19

Mapa de suelos del departamento de Cusco



#### **4.2.6. Capacidad de uso mayor (CUM)**

La naturaleza de un suelo está condicionada por multitud de factores que van desde el sustrato geológico, la pendiente, hasta el clima y la comunidad biótica que soporta. Su desarrollo, profundidad, textura y contenido en materia orgánica son parámetros que, entre otras, van a determinar en forma conjunta la capacidad de uso del suelo (Gore Cusco, 2005, p. 65). El Gobierno Regional del Cusco (2005) determinó e interpretó el potencial del recurso suelo tomando como base el Reglamento de Clasificación de Tierras, según su Capacidad de Uso Mayor establecido por el Ministerio de Agricultura del Perú (ver Figura 20). Según esto, los suelos de Cusco se organizan en Grupos.

**4.2.6.1. Tierras aptas para cultivo en limpio (símbolo A).** Suelos de calidad agrológica media, con muy pocas limitaciones que restrinjan su uso y sin problemas de manejabilidad, de excelente productividad bajo un manejo acertado y regular fertilidad natural.

**4.2.6.2. Tierras aptas para cultivo permanente (símbolo C).** Suelos cuyas condiciones ecológicas no son adecuadas a la remoción periódica (no arables) y continuada del suelo, pero que permiten la implantación de cultivos perennes (herbáceas, arbustivas o arbóreas); estas tierras podrían dedicarse también a otros fines: forestal, protección y pastoreo, siempre y cuando se obtenga rendimientos económicos superior a su aptitud natural.

**4.2.6.3. Tierras aptas para pastos (símbolo P).** Son los que no reúnen las condiciones ecológicas mínimas requeridas para el cultivo en limpio o permanente, pero que permiten su uso continuado o temporal para el pastoreo, bajo técnicas económicamente accesibles a los agricultores del lugar, sin deterioro de la capacidad productiva del recurso.

**4.2.6.4. Tierras para producción forestal (símbolo F).** Son tierras que no reúnen las condiciones ecológicas requeridas para su cultivo o pastoreo, pero permite su uso para la producción de maderas y otros productos forestales, siempre que sean manejadas en forma técnica para no causar deterioro en la capacidad productiva del suelo, estos suelos pueden

soportar también plantaciones de cultivos permanentes, pero requieren el uso de tecnologías adecuadas para conservar el suelo (p. 65).

**4.2.6.5. Tierras de Protección (símbolo X).** Son tierras que no reúnen condiciones ecológicas mínimas requeridas para el desarrollo de actividades productivas ni extractivas, se incluyen dentro de esta categoría, picos nevados, pantanos, playas, laderas fuertemente inclinadas, aunque cubiertas con vegetación incluso de tipo boscoso, su uso está fuertemente restringido por la fragilidad de los suelos y su alta susceptibilidad a los procesos erosivos (p. 68).

De acuerdo a la Tabla 8, el mayor porcentaje de suelos no presenta condiciones para el mantenimiento de actividades productivas y extractivas, debiendo dedicarse estas zonas como Protección (57% del total), sin embargo, esto no imposibilita su uso con actividades compatibles con su naturaleza, como es el ecoturismo y manejo de bosques.

Asimismo, el mayor potencial de suelos está referido a los de Pastoreo, que en sus diferentes calidades y asociaciones representa el 16.22% de la superficie regional, de este total el mayor porcentaje corresponde a los pastos de calidad agrológica baja. Además, los suelos de aptitud agrícola ya sea para Cultivo en limpio o permanente en conjunto apenas el 2.1% de la superficie regional (1496.48 Km<sup>2</sup>), y de estos suelos su calidad agrológica está entre media a baja; existiendo un potencial asociado entre cultivos y pastos que agrega al potencial agrícola de la región un 1.38% más. Por otro lado, otro potencial importante es el referido al Forestal, en conjunto representa el 13.64% de la superficie regional, aunque su calidad agrológica es mayormente baja y asociado a protección, por lo que el desarrollo de actividades forestales extractivas está fuertemente limitado, debiendo ser dedicada al contrario al manejo sostenible de bosques (Gore Cusco, 2005).

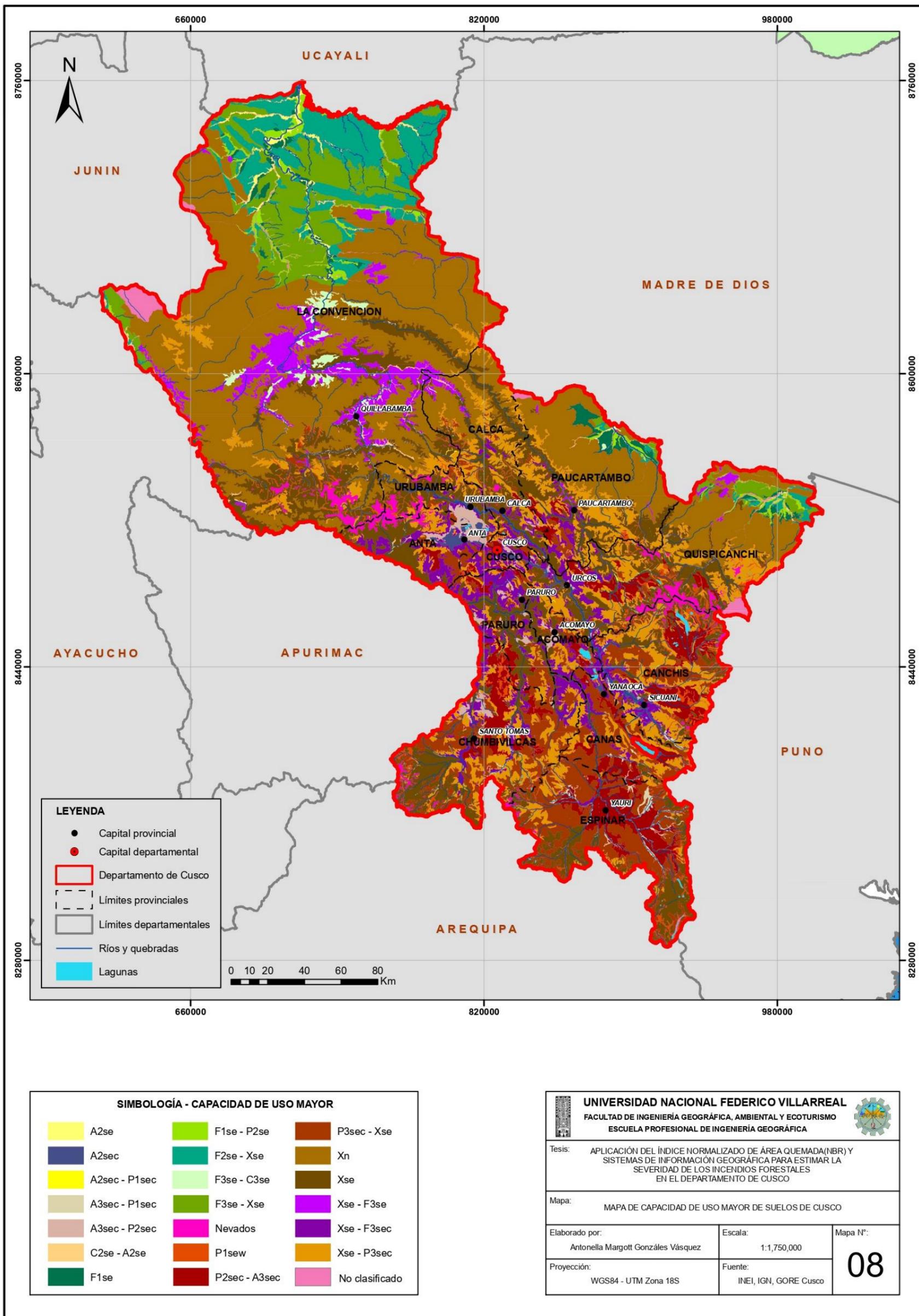
**Tabla 8***Capacidad de uso mayor*

<b>SÍMBOLO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>km2</b>	<b>%</b>
A2se	Cultivo en limpio calidad agrológica media con limitaciones de suelo y erosión	476.45	0.67
A2sec	Cultivo en limpio calidad agrológica media con limitaciones de suelo, erosión y clima	626.99	0.88
A2sec - P1sec	Cultivo en limpio calidad agrológica media con limitaciones de suelo, erosión y clima asociado a Pastos calidad agrológica alta con limitaciones de suelo, erosión y clima	47.13	0.07
A3sec - P1sec	Cultivo en limpio calidad agrológica baja con limitaciones de suelo, erosión y clima asociado a Pastos calidad agrológica alta con limitaciones de suelo, erosión y clima	318.18	0.45
A3sec - P2sec	Cultivo en limpio calidad agrológica baja con limitaciones de suelo, erosión y clima asociado a Pastos calidad agrológica media con limitaciones de suelo, erosión y clima	607.92	0.86
C2se - A2se	Cultivo permanente calidad agrológica media con limitaciones de suelo y erosión asociado a Cultivo en limpio calidad agrológica media con limitaciones de suelos y erosión	393.04	0.55
F1se	Forestal calidad agrológica alta con limitaciones de suelo y erosión	690.89	0.97
F1se - P2se	Forestal calidad agrológica alta con limitaciones de suelo y erosión asociado a Pastos calidad agrológica media con limitaciones de suelo y erosión	855.55	1.21
F2se - Xse	Forestal calidad agrológica media con limitaciones de suelo y erosión asociado a protección	3827.56	5.39
F3se - C3se	Forestal calidad agrológica baja con limitaciones de suelo y erosión asociado a Cultivo permanente calidad agrológica baja con limitaciones de suelo y erosión	475.92	0.67
F3se - Xse	Forestal calidad agrológica baja con limitaciones de suelo y erosión asociado a protección	3836.36	5.4
Nevados	Formación nival	1138.6	1.6
P1sew	Pastos calidad agrológica alta con limitaciones de suelo, erosión y drenaje	1374.04	1.94
P2sec - A3sec	Pastos calidad agrológica media con limitaciones de suelo, erosión y clima asociado a Cultivo en limpio calidad agrológica baja con limitaciones de suelo, erosión y clima.	3717.53	5.24
P3sec - Xse	Pasto calidad agrológica baja con limitaciones de suelo, erosión y clima asociado a protección.	6418.19	9.04
Xn	Protección bosque nublado	21145.1	29.79
Xse	Protección por suelo y erosión	12149.82	17.12
Xse - F3se	Protección por suelo y erosión asociado a Forestal calidad agrológica baja con limitaciones de suelo y erosión	2329.14	3.28
Xse - F3sec	Protección por suelo y erosión asociado a Forestal calidad agrológica baja con limitaciones de suelo, erosión y clima	3179.15	4.48
Xse - P3sec	Protección por suelo y erosión asociado a Pastos calidad agrológica baja con limitaciones de suelo, erosión y clima.	7372.4	10.39
<b>TOTAL</b>		<b>70979.96</b>	<b>100</b>

*Nota.* Adaptada de *Capacidad de uso mayor de suelos*, por Gobierno Regional del Cusco, 2005, Zonificación Ecológica Económica – Departamento de Cusco.

Figura 20

Mapa de Capacidad de uso mayor del departamento de Cusco



#### 4.2.7. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal puede ser definida como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomásas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales (MINAM, 2019c). La clasificación de la cobertura vegetal consistió en jerarquizar las unidades de cobertura vegetal (representadas en la leyenda del mapa, figura 21), basados en criterios que van de lo general a lo particular como los siguientes: geográficos, climáticos, fisonómicos y fisiográficos. El criterio geográfico consistió en dividir el territorio en 4 grandes regiones naturales, como son Amazonía tropical o selva baja, yunga o selva alta, andina o sierra y costa (MINAM, 2015). Según la Tabla 9, Cusco presenta 23 tipos de cobertura vegetal, 3 unidades antrópicas de cobertura vegetal y 6 otros tipos de cobertura; siendo el Pajonal andino quien presenta mayor área en el ámbito de estudio con un 31%, seguido del Bosque de montaña basimontano (región yunga) con un 13%.

**Tabla 9**

#### *Unidades de cobertura vegetal*

Región natural	Tipos de cobertura vegetal	Símbolo	Km <sup>2</sup>	%
Tropical (selva baja)	Bosque de terraza alta	Bta	487.09	0.68
	Bosque de terraza baja	Btb	451.36	0.63
	Vegetación de isla	Is	12.18	0.02
	Bosque de colina alta	Bca	2513.17	3.48
	Bosque de colina baja	Bcb	899.13	1.25
	Bosque de montaña	Bm	1701.11	2.36
	Bosque de terraza baja con paca	Btb-pa	409.28	0.57
	Bosque de terraza alta con paca	Bta-pa	278.74	0.39
	Bosque de colina alta con paca	Bca-pa	2375	3.29
	Bosque de colina baja con paca	Bcb-pa	1377.9	1.91
	Bosque de montaña con paca	Bm-pa	34.98	0.05
	Pacal	Pac	196.78	0.27
Región Yunga (selva alta)	Bosque de montaña basimontano	Bm-ba	9645.79	13.37
	Bosque de montaña montano	Bm-mo	6976.5	9.67
	Bosque de montaña altimontano	Bm-al	2419.53	3.35
	Bosque de montaña basimontano con paca	Bm-ba-pa	534.42	0.74
	Matorral arbustivo altimontano	Ma-al	26.54	0.04

Región andina	Bosque xérico interandino	Bxe-in	203.5	0.28
	Bosque relicto mesoandino	Br-me	0.94	0.001
	Bosque relicto altoandino	Br-al	9.54	0.01
	Pajonal andino	Pj	22430.34	31.1
	Bofedal	Bo	656.96	0.91
Unidades antrópicas de cobertura vegetal	Matorral arbustivo	Ma	5540.78	7.68
	Plantación Forestal	PF	161.3	0.22
	Agricultura costera y andina	Agri	2294.96	3.18
Otras coberturas	Áreas de no bosque amazónico	Ano-ba	6318.53	8.76
	Área urbana	U	46.85	0.06
	Área altoandina con escasa y sin vegetación	Esv	2847.74	3.95
	Centro minero	Mi	17.49	0.02
	Glaciar	Gla	506.84	0.7
	Lagunas, lagos y cochas	L/Co	221.31	0.31
	Río	R	531.65	0.74
<b>Total</b>			<b>72128.23</b>	<b>100</b>

*Nota.* Adaptada de *Clasificación de la cobertura vegetal*, por Ministerio del Ambiente, 2015, Mapa Nacional de Cobertura Vegetal.

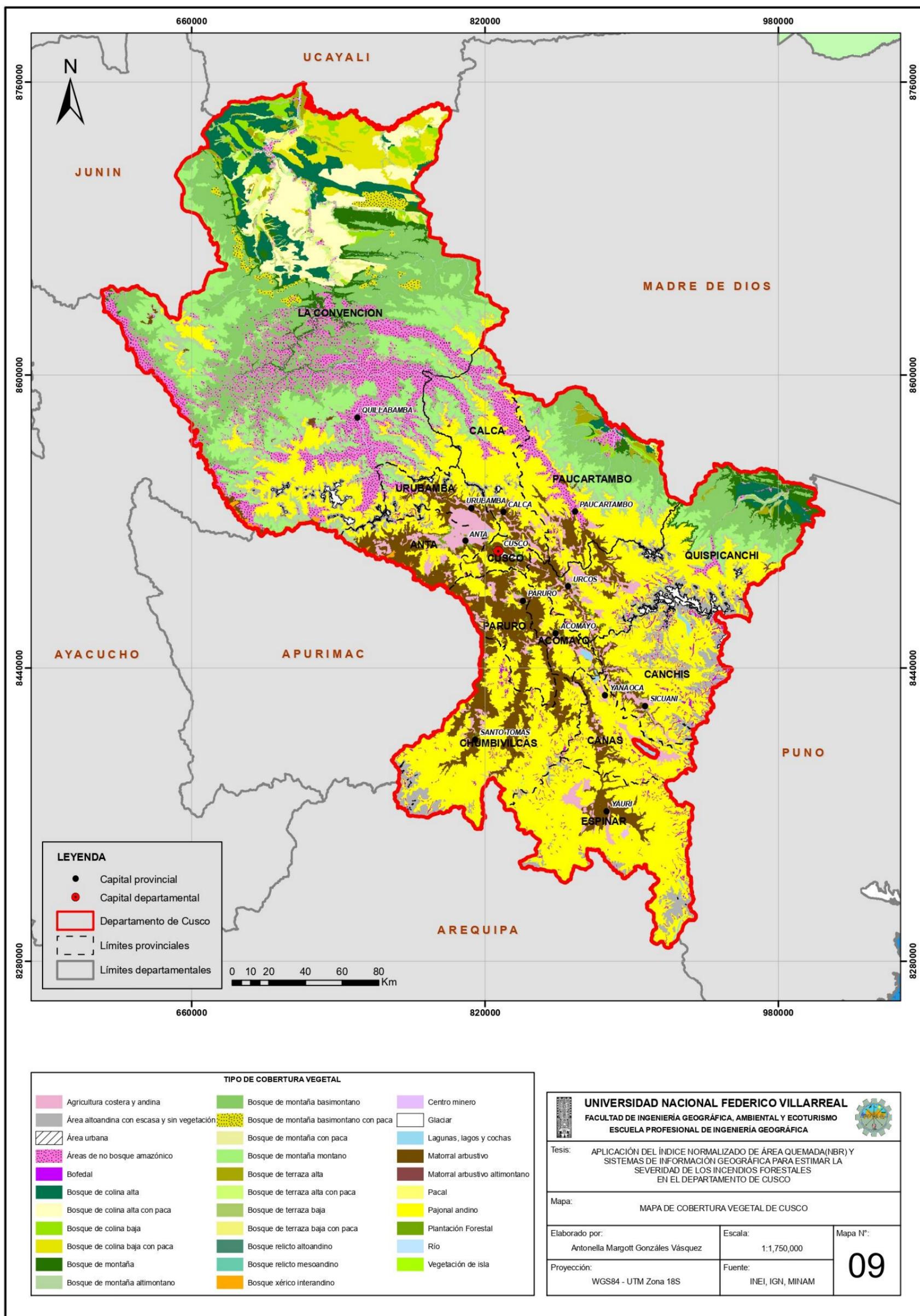
Entre los tipos de cobertura vegetal más predominantes tenemos:

**4.2.7.1. Pajonal andino (Pj).** Está conformado mayormente por herbazales ubicado en la porción superior de la cordillera de los andes, aproximadamente entre 3800 y 4800 m s. n. m. Se desarrolla sobre terrenos que van desde casi planos como en las altiplanicies hasta empinados o escarpado, en las depresiones y fondo de valles glaciares. Dividiéndola en subunidades, fisonómicamente y florísticamente diferentes, tales como: pajonal (hierbas en forma de manojos de hasta 80 cm de alto), césped (hierbas de porte bajo hasta de 15 cm de alto) y tolar, arbustos de hasta 1.20 m de alto (MINAM, 2015, p. 75).

**4.2.7.2. Bosque de montaña basimontano (Bm-ba).** Se extiende a través de todo el flanco oriental del macizo andino, ocupando la porción inferior de la Yunga, desde aproximadamente los 800 m s. n. m. (pie de monte) hasta los 2000 m s. n. m. Este bosque ocupa laderas cubiertas de material coluvial, con pendiente desde 25% hasta más de 50% y en donde se origina producto de la erosión ocasionada por la alta precipitación pluvial, una red de quebradas que forman muchos valles estrechos en los niveles inferiores (MINAM, 2015, p.44).

Figura 21

Mapa de Cobertura Vegetal del departamento de Cusco



#### 4.2.8. Ecosistemas

Se entiende por ecosistema a “un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional” (Organización de las Naciones Unidas, [ONU] 1992, p. 4). El Ministerio del Ambiente (2019c) identificó y definió 39 ecosistemas naturales a nivel nacional, y de estos se tienen 36 ecosistemas mapeados. Las unidades identificadas hacen referencia a los ecosistemas naturales terrestres como unidades funcionales reconocibles a una escala adecuada al territorio, como los bosques, los humedales, los páramos, las lomas costeras, los desiertos, los pajonales, entre otros. De acuerdo a la Tabla 10, para el departamento de Cusco se identificaron un total de 24 ecosistemas; de los cuales, el ecosistema predominante es el Pajonal de puna húmeda (región andina) con un 25%, seguido del Bosque montano de Yunga con un 12% del total y el Bosque basimontano de Yunga con un 11%. Estos tipos de ecosistemas se pueden observar en la Figura 22.

**Tabla 10**

*Tipos de ecosistemas identificados*

<b>Región Natural</b>	<b>Ecosistema</b>	<b>Símbolo</b>	<b>km2</b>	<b>%</b>
Selva Tropical	Bosque aluvial inundable	B-ai	823.13	1.14
	Bosque de terraza no inundable	B-tni	780.09	1.08
	Bosque de colina baja	B-cb	3998.36	5.54
	Bosque de colina alta	B-ca	4422.5	6.13
	Pacal	Pac	197.03	0.27
Yunga	Bosque estacionalmente seco oriental (Huallaga, Ene - Perené, Urubamba)	Bes-or	134.04	0.19
	Bosque basimontano de Yunga	B-bY	7791.17	10.80
	Bosque montano de Yunga	B-mY	8697.2	12.06
	Bosque altimontano (Pluvial) de Yunga	B-aY	6755.2	9.37
Andina	Pajonal de puna seca	Pjps	3948.84	5.48
	Pajonal de puna húmeda	Pjph	18008.36	24.97
	Bofedal	Bo	656.27	0.91
	Zona periglaciario y glaciar	Zp-gla	3356.61	4.65
	Bosque relicto altoandino (Queñoal y otros)	Br-a	46.41	0.06
	Bosque relicto mesoandino	Br-ma	2.07	0.003

	Bosque estacionalmente seco interandino (Marañón, Mantaro, Pampas y Apurímac)	Bes-in	245.45	0.3
	Matorral andino	Ma	5448.36	7.6
Ecosistemas acuáticos	Lago y laguna	L	199.22	0.3
	Río	R	542.9	0.8
Zonas intervenidas	Plantación forestal	Pf	159.75	0.2
	Zona agrícola	Agri	2330.37	3.2
	Zona urbana	Urb	74.79	0.1
	Zona minera	Min	19.57	0.0
	Vegetación secundaria	Vsec	3485.02	4.8
<b>Total</b>			<b>72122.71</b>	<b>100</b>

*Nota.* Adaptada de *Lista de ecosistemas definidos*, por Ministerio del Ambiente, 2019c, Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú – Memoria Descriptiva.

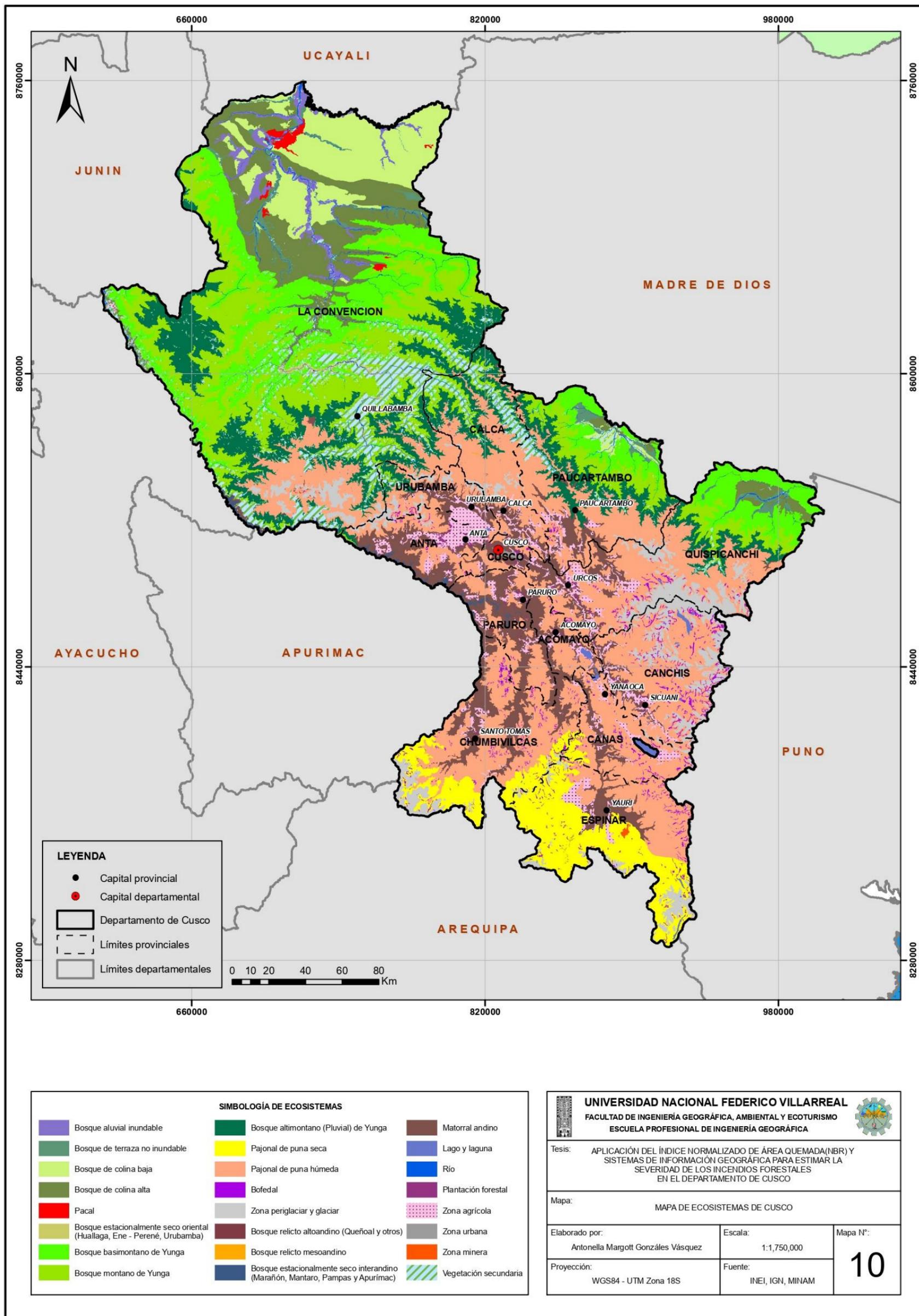
Entre los ecosistemas más importantes tenemos:

**4.2.8.1. Pajonal de puna húmeda.** Ecosistema altoandino con vegetación herbácea constituida principalmente por céspedes dominados por gramíneas de porte bajo y pajonales dominados por gramíneas que crecen amacolladas, dispersas y son de tallo y hojas duras, y algunas asociaciones arbustivas dispersas; intercalándose vegetación saxícola en los afloramientos rocosos. Puede ocupar terrenos planos u ondulados o colinas de pendiente suave a moderada. Presenta una cobertura de 35-50% y su altura generalmente no supera 1.5 m. Una comunidad notable está conformada por los rodales de *Puya Raimondi* (MINAM, 2019a, p. 72).

**4.2.8.2 Bosque montano de yunga.** Ecosistema forestal montano ubicado en las vertientes orientales de los Andes (entre 1 800 - 2 000 y 2 500 m s. n. m.), con fuertes pendientes. Bosque con dosel cerrado, con tres estratos distinguibles. La altura del dosel o cúpula alcanza 18-25 m, con algunos árboles emergentes de 30 m. Los niveles de riqueza florística pueden ser altos a muy altos. Según la orientación de la pendiente puede estar recurrentemente cubierto de neblina. Presencia de abundantes epífitas, líquenes, bromeliáceas y orquidáceas. Es notable la presencia de helechos arborescentes que alcanzan más de 10 m de altura y diámetros de hasta 20 cm, principalmente del género *Cyathea* (MINAM, 2019a, p. 68).

Figura 22

Mapa de Ecosistemas del departamento de Cusco



### 4.3. Distribución espacial y temporal de los incendios forestales

#### 4.3.1. Distribución a nivel nacional

Según la información descargada del Registro Histórico georreferenciado de ocurrencias de incendios forestales del MINAM y de acuerdo a la Tabla 11, a nivel nacional entre los años 2000 al 2021 se tuvo un total de 18315 eventos.

**Tabla 11**

*Ocurrencia de incendios forestales en el Perú (2000 – 2021)*

N°	DEPARTAMENTOS DEL PERÚ	N° INCENDIOS FORESTALES	%
1	CUSCO	2990	16.33
2	CAJAMARCA	2160	11.79
3	PUNO	1543	8.42
4	ÁNCASH	1485	8.11
5	HUÁNUCO	1416	7.73
6	APURÍMAC	1280	6.99
7	AYACUCHO	1098	6.00
8	HUANCAVELICA	1007	5.50
9	JUNÍN	970	5.30
10	AMAZONAS	898	4.90
11	LA LIBERTAD	708	3.87
12	PASCO	550	3.00
13	AREQUIPA	471	2.57
14	PIURA	337	1.84
15	UCAYALI	337	1.84
16	MADRE DE DIOS	260	1.42
17	LIMA	225	1.23
18	SAN MARTÍN	181	0.99
19	MOQUEGUA	179	0.98
20	LAMBAYEQUE	79	0.43
21	ICA	58	0.32
22	TUMBES	58	0.32
23	LORETO	13	0.07
24	TACNA	12	0.07
	<b>TOTAL</b>	<b>18315</b>	<b>100.00</b>

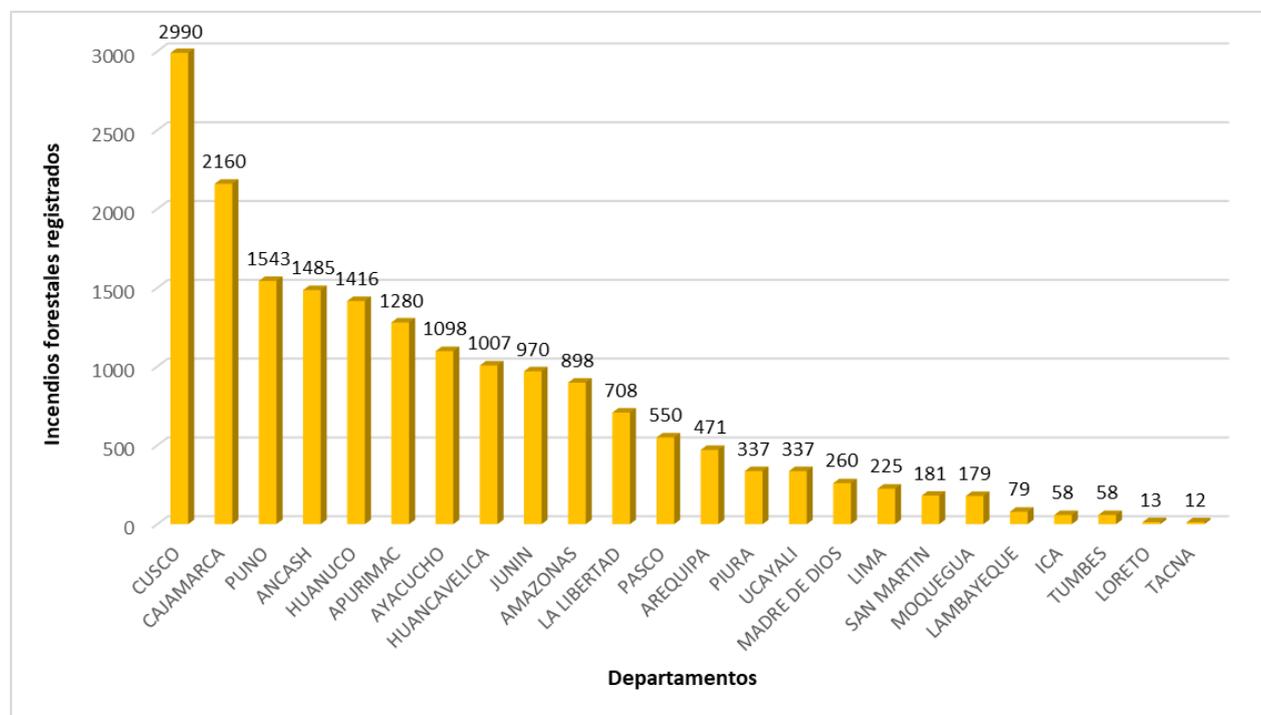
*Nota.* Elaboración propia.

En la Tabla 11 y Figura 23, se puede apreciar que el departamento de Cusco se encuentra en primer lugar con el mayor número de ocurrencias de incendios forestales a nivel nacional, teniendo un total de 2990 incendios registrados. Asimismo, uno de los departamentos

que ha presentado menor ocurrencia de incendios es Tacna, presentando a nivel histórico un total de 12 eventos registrados.

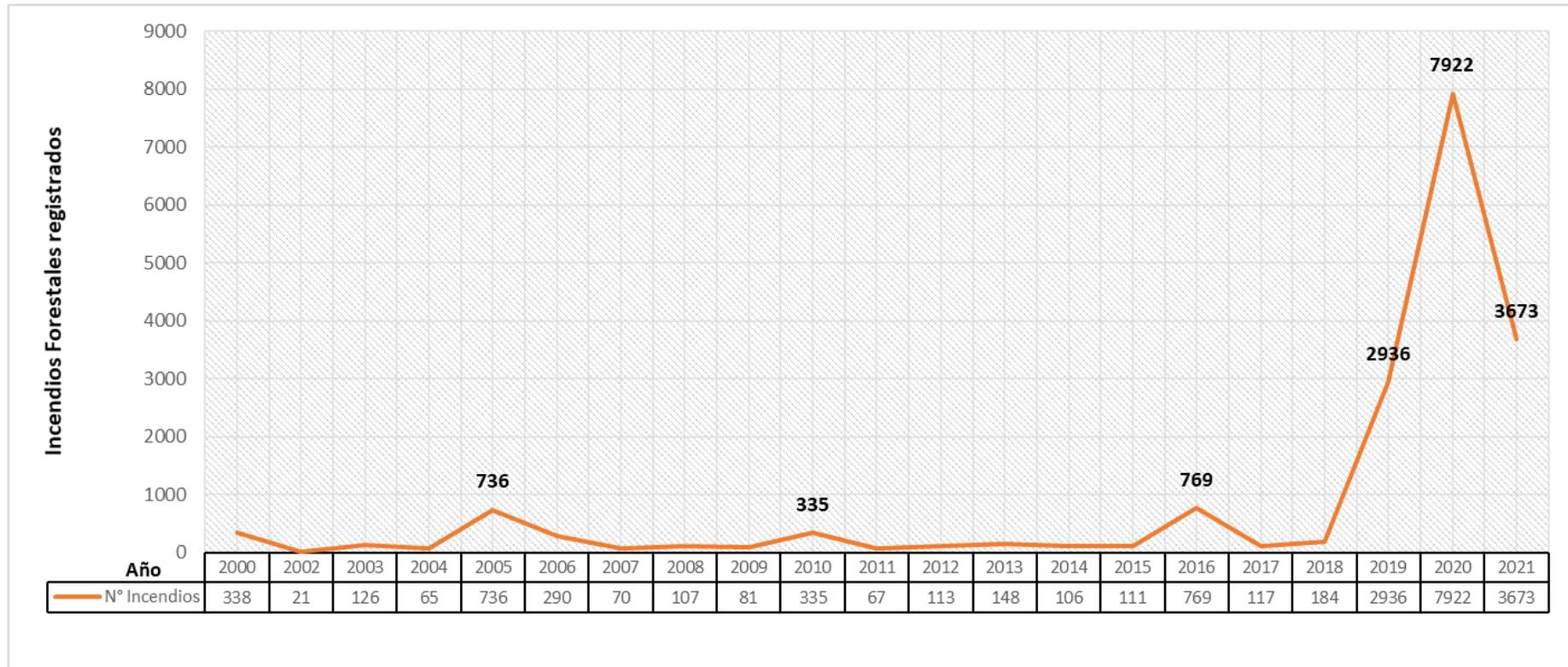
### Figura 23

*Número de Incendios Forestales por departamento (2000 – 2021)*



*Nota.* Elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 24 se observa que los años 2005, 2010, 2016 presentaron mayores ocurrencias de incendios forestales a nivel nacional; este incremento severo de los incendios se podría relacionar al periodo de estiaje e inicio de la temporada de lluvias entre agosto y noviembre (Figura 25), a un retraso en el inicio de las lluvias en los Andes o periodos de sequía extrema en la Amazonía (Zubieta et al., 2019). También, se muestra un incremento exponencial de incidencia de estos eventos para los años 2019, 2020 y 2021 y el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2020) menciona que posiblemente este incremento se deba a una mayor accesibilidad a nuevos recursos tecnológicos de geolocalización de estas cicatrices.

**Figura 24***Incendios forestales registrados por año en el Perú**Nota.* Elaboración propia.

Como se mencionó en un párrafo anterior, en la Figura 25 se puede apreciar que a nivel histórico la mayor cantidad de incendios forestales se han generado entre los meses de agosto a noviembre, esta información se puede asociar a la temporada seca, donde el fuego es utilizado en el manejo de prácticas agropecuarias y cambios de uso del suelo (Manta, 2017; Manta y León, 2004; como es citado en CENEPRED, 2020, p. 27).

### Figura 25

*Tendencia mensual de incendios forestales en el Perú (2000 – 2021)*



*Nota.* Elaboración propia.

#### 4.3.2. Distribución a nivel del departamento de Cusco

El departamento de Cusco es uno de los departamentos más afectados por los incendios forestales a nivel nacional, presentando históricamente 2990 eventos mapeados desde los años 2000 al 2021.

En la Tabla 12 y Figura 26 se puede observar que la provincia de La Convención presenta mayor ocurrencia de incendios forestales, teniendo así 664 eventos registrados (representando más del 22% del total de provincias). Por otro lado, Acomayo es la provincia

que presenta menor número de ocurrencias teniendo en total 58 incendios mapeados a nivel histórico.

**Tabla 12**

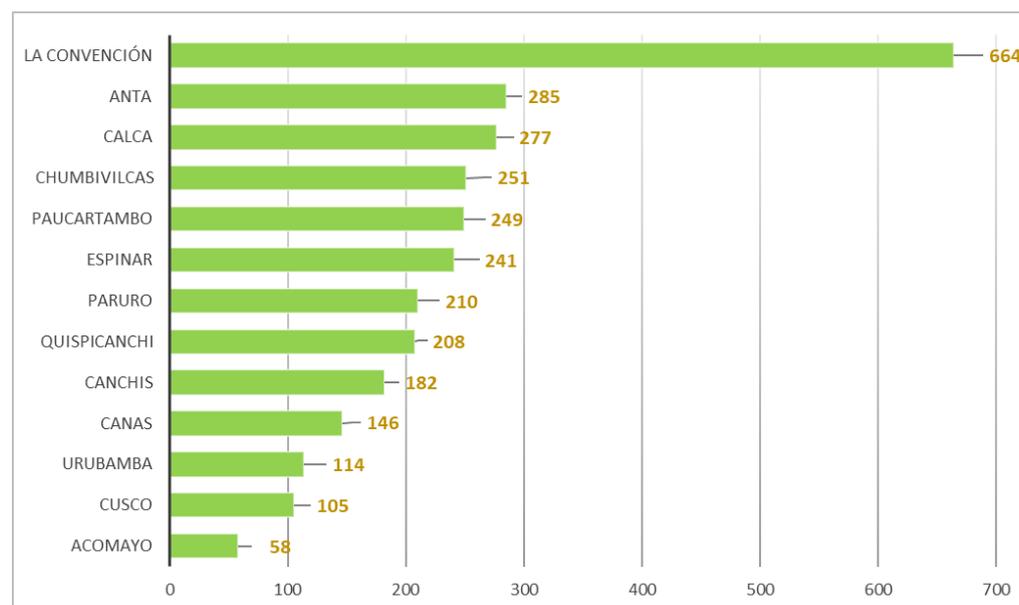
*Ocurrencia de incendios forestales en el departamento de Cusco (2000 – 2021)*

N°	PROVINCIAS	N° INCENDIOS FORESTALES	%
1	ACOMAYO	58	1.94
2	CUSCO	105	3.51
3	URUBAMBA	114	3.81
4	CANAS	146	4.88
5	CANCHIS	182	6.09
6	QUISPICANCHI	208	6.96
7	PARURO	210	7.02
8	ESPINAR	241	8.06
9	PAUCARTAMBO	249	8.33
10	CHUMBIVILCAS	251	8.39
11	CALCA	277	9.26
12	ANTA	285	9.53
13	LA CONVENCION	664	22.21
	<b>TOTAL</b>	<b>2990</b>	<b>100.00</b>

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 26**

*Número de Incendios Forestales en las provincias de Cusco (2000 – 2021)*



*Nota.* Elaboración propia.

### 4.3.3. Distribución a nivel de la provincia de Espinar

De acuerdo a la Tabla 13 y Figura 27, los incendios forestales en la Provincia de Espinar a nivel histórico entre los años 2000 al 2021 fueron 241 registros. Asimismo, se identifica que el distrito de Coporaque presenta mayor incidencia de estos eventos, con un total de 95 eventos, que representa casi el 40% a nivel de toda la provincia.

**Tabla 13**

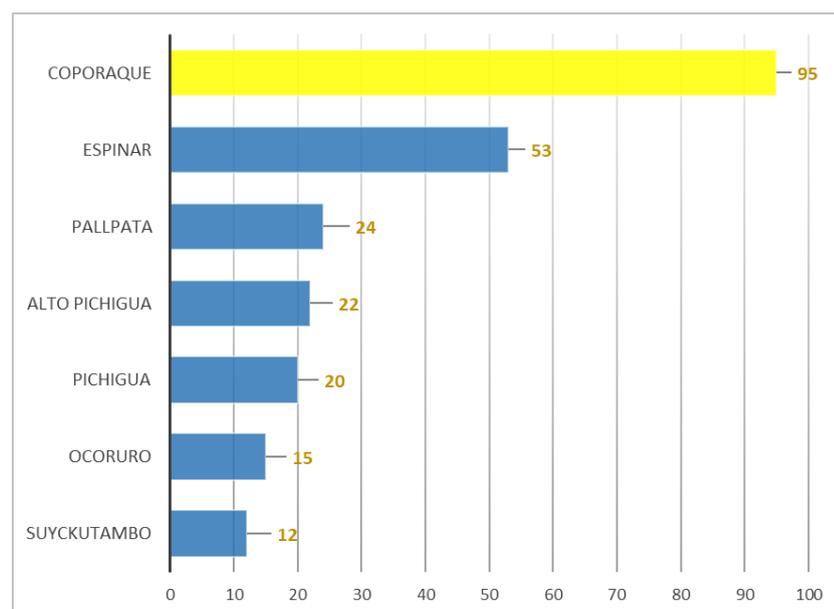
*Ocurrencia de incendios forestales en la Provincia de Espinar*

Nº	PROVINCIA ESPINAR	Nº INCENDIOS FORESTALES	%
1	SUYCKUTAMBO	12	4.98
2	OCORURO	15	6.22
3	PICHIGUA	20	8.30
4	ALTO PICHIGUA	22	9.13
5	PALLPATA	24	9.96
6	ESPINAR	53	21.99
7	<b>COPORAQUE</b>	95	39.42
	<b>TOTAL</b>	<b>241</b>	<b>100.00</b>

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 27**

*Número de Incendios Forestales en los distritos de Espinar (2000 – 2021)*



*Nota.* Elaboración propia.

#### **4.4. Mapeo de Severidad de incendios forestales con el índice NBR**

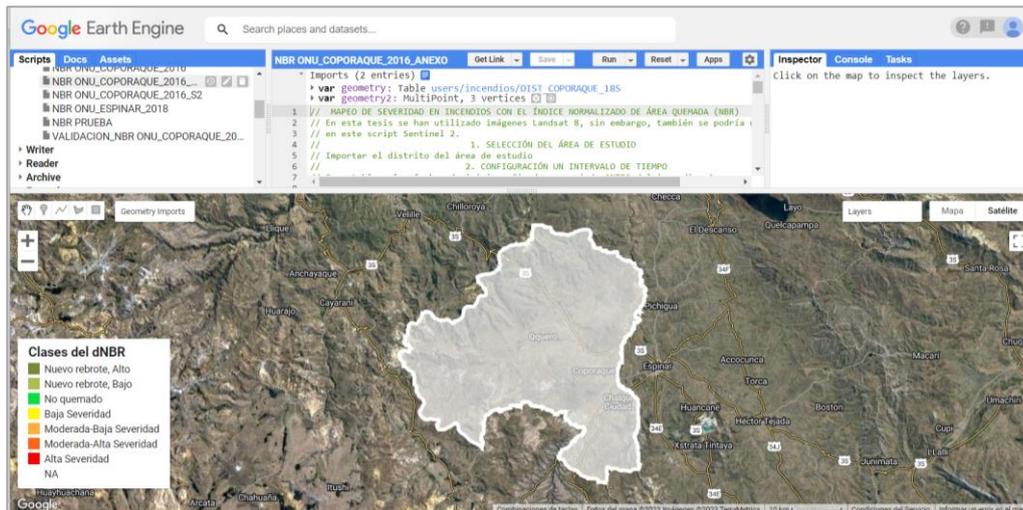
El mapeo de la severidad de incendios forestales se realizó en el Code Editor de la Plataforma de Google Earth Engine (GEE), utilizando el script de la ONU – SPIDER aplicado a un gran incendio forestal ocurrido en el distrito de Coporaque, siendo el distrito más afectado por los incendios forestales en la provincia de Espinar, del departamento de Cusco. A continuación, describiremos los detalles que contiene el script.

##### ***4.4.1. Selección del Área de estudio***

La selección del área de estudio se puede realizar con 3 métodos diferentes: por medio de un shapefile, a través de un ID de Feature Collection (dentro del mismo GEE) o polígonos dibujados a mano alzada. En este caso se utilizó un shapefile del distrito de ocurrencia del incendio forestal, ya que la información de los eventos están en formato punto (.shp) y queremos saber la delimitación de la cicatriz del incendio. Sabemos que ocurrió un gran incendio (área aproximada de 800 Ha, según información de SINPAD - INDECI) el 07 de agosto del año 2016 en el distrito de Coporaque. Entonces, se procedió a subir el shapefile (formato polígono) del distrito de Coporaque a la Plataforma de GEE y se incorporó en el script de aplicación. Asimismo, el script contiene la localización del área (tipo geometría) y centrado en todo el mapa; quedando como se muestra en la Figura 28.

#### **Figura 28**

*Selección del área de estudio por shapefile (distrito de Coporaque)*



#### 4.4.2. Marco de Tiempo

Luego de seleccionar el área de estudio, se definió los intervalos de tiempo previos y posteriores al incendio, se seleccionó un intervalo en el script porque da la posibilidad que haya más de una escena por mosaico y ayude a tener una imagen satelital con menor cobertura de nubes. En este caso el periodo de fechas antes del incendio (pre-fuego) fueron: Inicio (2016-07-20) y Fin (2016-08-06). Por otro lado, el periodo de fechas después del incendio (post fuego): Inicio (2016-08-07) y Fin (2016-08-18).

#### 4.4.3. Selección del satélite

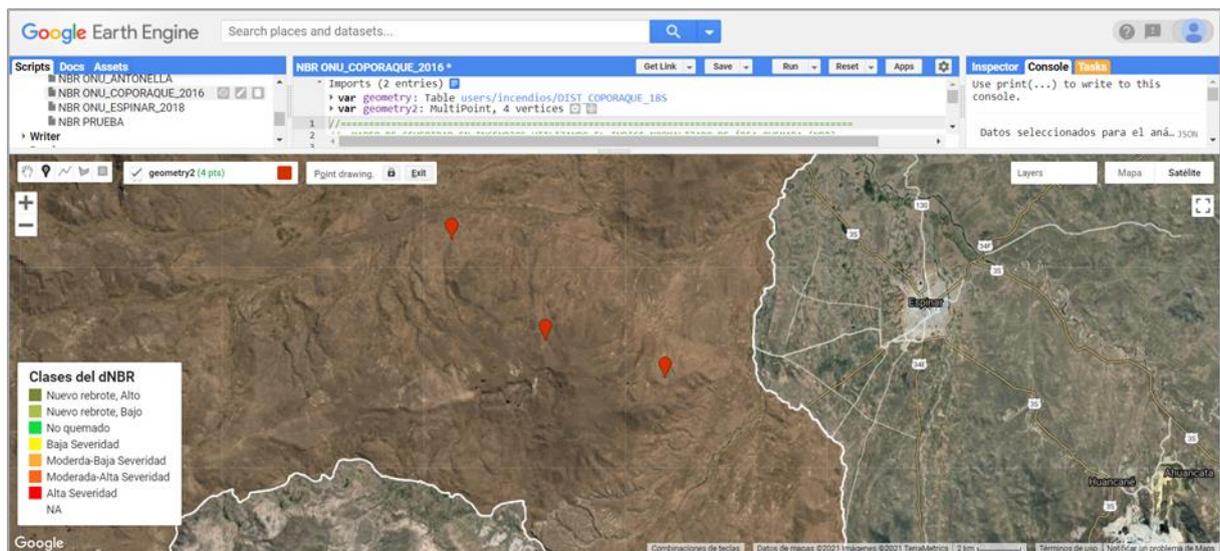
En este punto al ya tener nuestro marco de tiempo, se seleccionó la colección de datos de satélite disponibles para este script en el cual se desea trabajar, en nuestro caso Landsat 8 (Landsat/LC08/C01/T1\_SR). Cabe recalcar que la colección de imágenes utilizada fue de reflectancia superficial corregida atmosféricamente (ver Anexo B). Hasta aquí se tienen los 3 pasos más importantes que se debe modificar dentro del script; la selección del área de estudio, el marco de tiempo y el satélite a trabajar.

Además, el script contiene un enmascaramiento de nubes y nieve de la banda de calidad de Landsat 8 (BQA). Por lo tanto, las nubes, la nieve y sus sombras son “eliminadas” de todas las imágenes de una colección de Landsat 8 seleccionada; teniendo como resultado un mosaico

de imágenes enmascaradas conteniendo el menor porcentaje posible de nubes y nieve. Producto de estos pasos, dieron como resultado las imágenes previa y posterior al evento enmascaradas y escaladas a la reflectancia TOA, sin las bandas de QA. Tal como se aprecia en las Figuras 29 y 30.

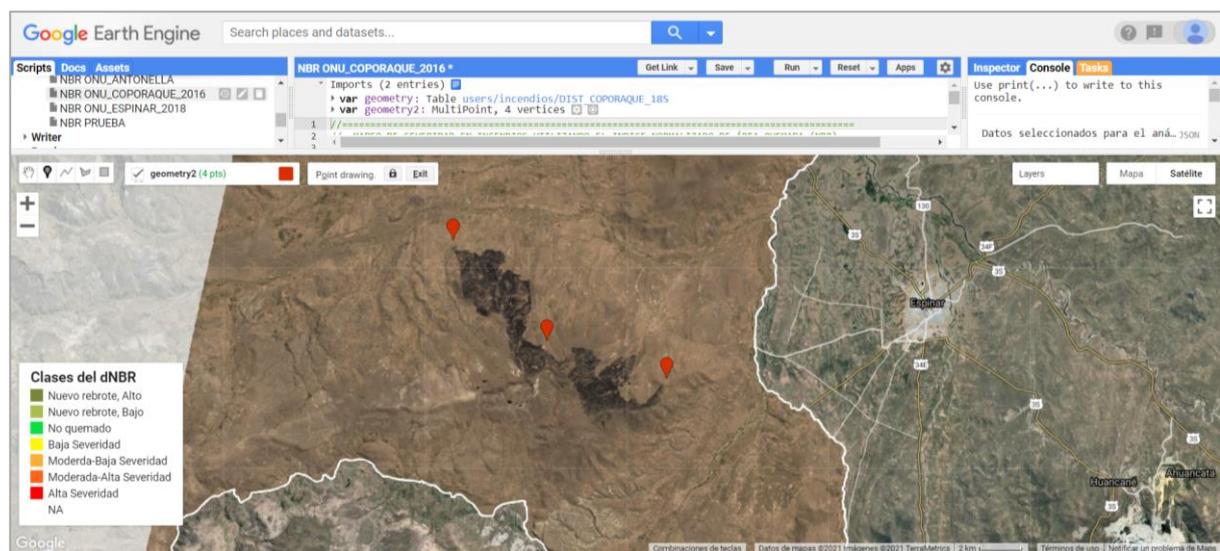
**Figura 29**

*Imagen previa al incendio forestal con máscara de nubes*



**Figura 30**

*Imagen posterior al incendio forestal con máscara de nubes*

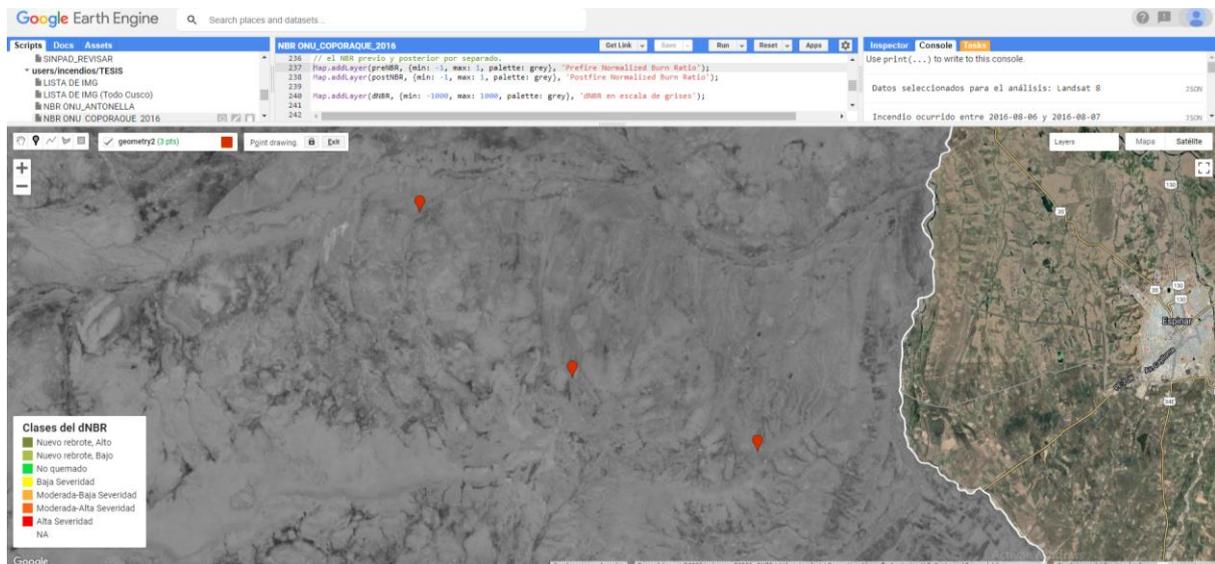


#### 4.4.4. Cálculo del Índice Normalizado de área quemada (NBR)

Se calculó el NBR para imágenes previas y posteriores al incendio, utilizando la banda 5 (infrarrojo cercano - NIR) y banda 7 (infrarrojo de onda corta 2 – SWIR2) del sensor Landsat 8. La fórmula en general es la siguiente:  $NBR = (NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)$ , pero en GEE existe una función definida para determinar la variable NBR, el cual se encuentra en el script adaptado (se utiliza la fórmula del NDVI – “normalizedDifference”, pero con las bandas 5 y 7). En las Figuras 31 y 32 se muestran los resultados del cálculo del NBR previa y posterior al incendio, respectivamente. Cabe resaltar que teniendo el NBR posterior al incendio, ya tendríamos calculado e identificado el área total del incendio. Pero uno de los objetivos de esta investigación es además estimar el nivel de severidad de este gran incendio.

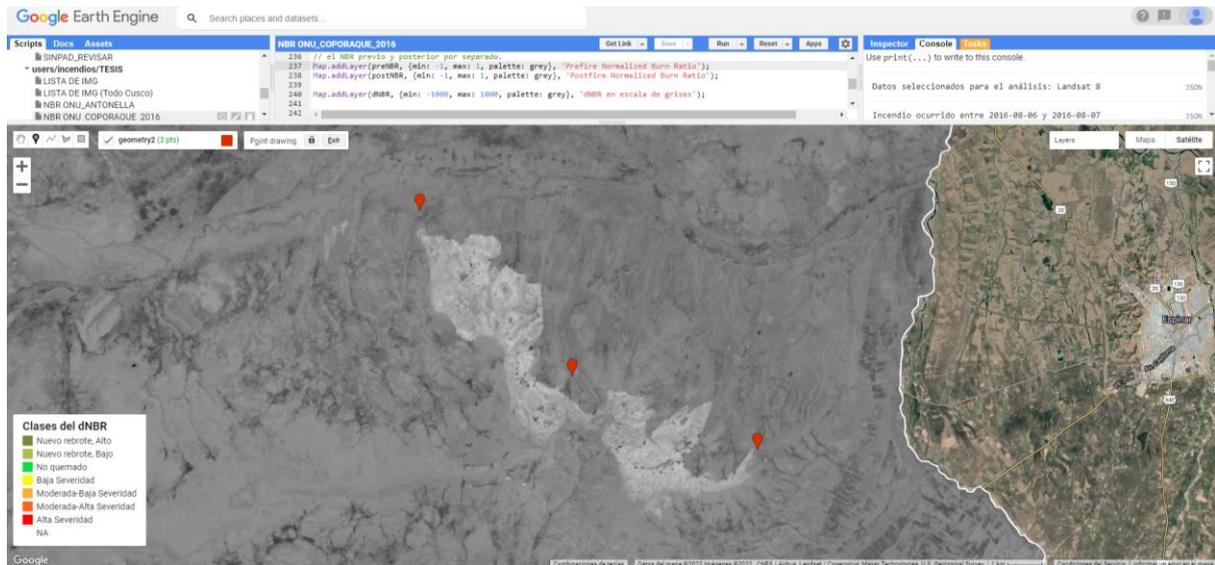
#### Figura 31

*Resultado del cálculo de NBR previa al incendio*



#### Figura 32

*Resultado del cálculo de NBR posterior al incendio*

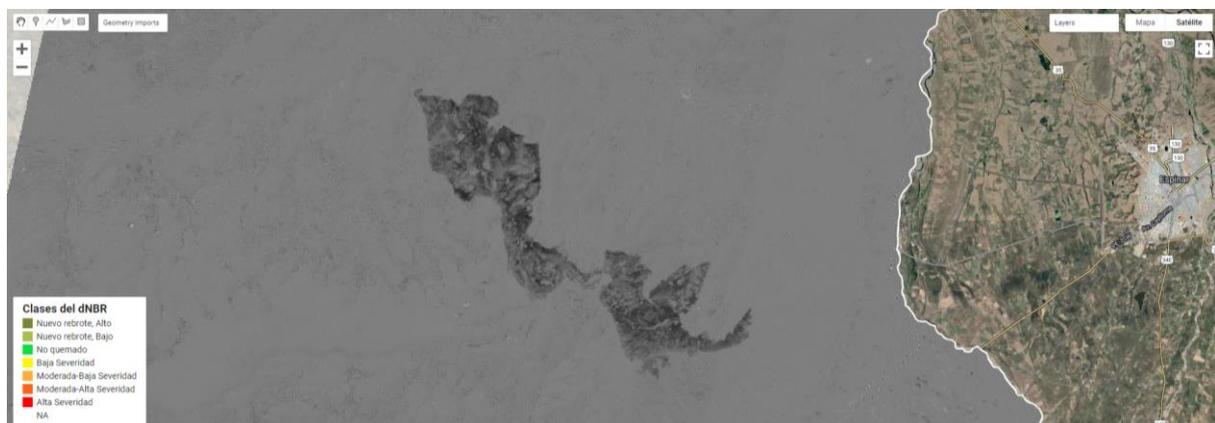


#### 4.4.5. Cálculo de la severidad de incendios (dNBR)

En este punto se procedió a calcular la dNBR con “subtract”, que básicamente es la diferencia entre el NBR previo y el NBR posterior al incendio. Después de esto, los valores obtenidos de la dNBR se escalan a los estándares de la USGS, es decir se multiplica por 1000 a esos valores. Finalmente se procedió a correr el script y dio como resultado el mapeo de severidad de incendios, en la Figura 33 se aprecia esto a escala grises y en la Figura 34 clasificado a color.

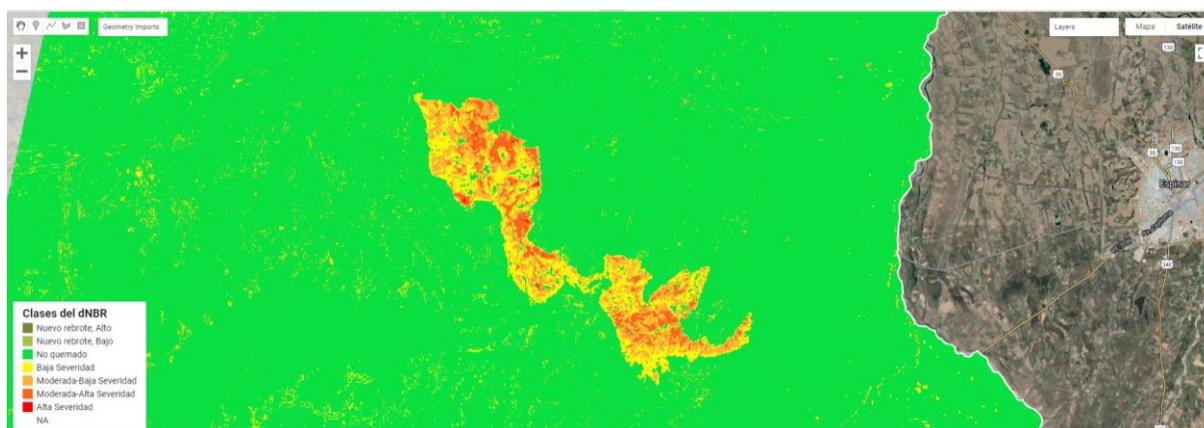
#### Figura 33

*Resultado del cálculo de severidad de incendios - dNBR a grises*



## Figura 34

*Resultado del cálculo de severidad de incendios - dNBR a color*



### 4.5. Evaluación de severidad de los incendios forestales

Tras obtener como producto el mapeo de la severidad de incendios en GEE, para un gran incendio en el distrito de Coporaque, provincia de Espinar. Se procedió a exportar el mapa de severidad al Drive de Google que está afiliado a nuestro correo electrónico de la cuenta de GEE, este se guarda en formato .tif, que sale por defecto ya que son datos ráster. Este ráster nos indica que las áreas con valores de dNBR más altos presentan daños más severos (mayor afectación de áreas por el incendio), mientras que las áreas con valores de dNBR negativos pueden mostrar una mayor productividad de la vegetación (menor afectación de áreas ante este incendio). La dNBR se clasificó de acuerdo con los rangos de severidad de incendios propuestos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), así como la codificación por colores (Figura 35). Cabe resaltar que, en nuestro caso, para una Alta severidad (High Severity) se codificó con el color rojo como se encuentra en el script final adaptado (Anexo C).

## Figura 35

*Niveles de severidad de incendios y codificación por colores*

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10 <sup>3</sup> )	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Moderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

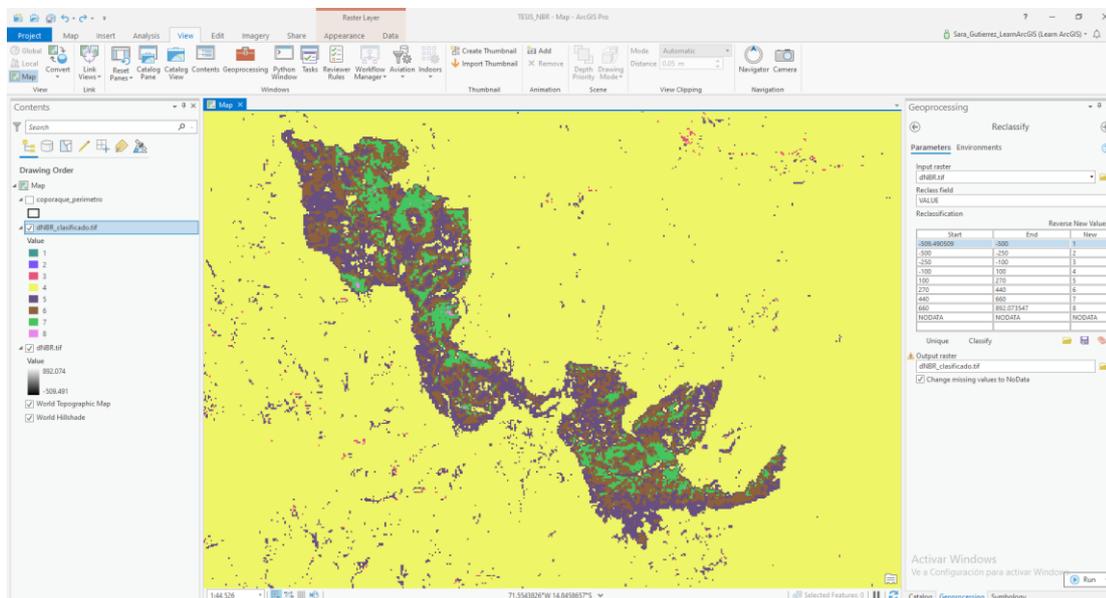
Nota. Tomada de USGS, como se citó en ONU. <https://un-spider.org/es/node/10959>.

#### 4.5.1. Reclasificación de los niveles de severidad

Teniendo la severidad de incendios en formato .tif, lo plasmamos en el ArcGIS Pro, luego se realizó la reclasificación de los niveles de severidad con los rangos establecidos por la USGS (Figura 35). Este proceso se encuentra en ArcToolbox -> Spatial Analyst Tools -> Reclass -> "Reclassify" y nos dio como resultado la Figura 36.

#### Figura 36

##### Resultado de la Reclasificación

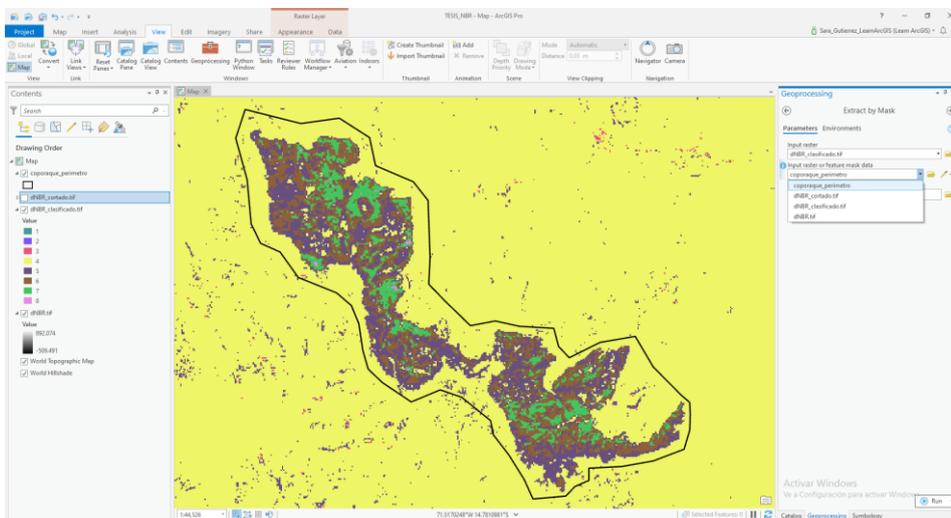


#### 4.5.2. Cortar el área del incendio

Con la reclasificación de la severidad de incendios en formato .tif plasmada en el ArcGis Pro se procedió a cortar el área del incendio con la ayuda de un polígono en formato .shp, que se creó a mano alzada (Figura 37). Este proceso se encuentra en ArcToolbox -> Spatial Analyst Tools -> Extraction -> “Extract by Mask”; y nos dio como resultado la Figura 38.

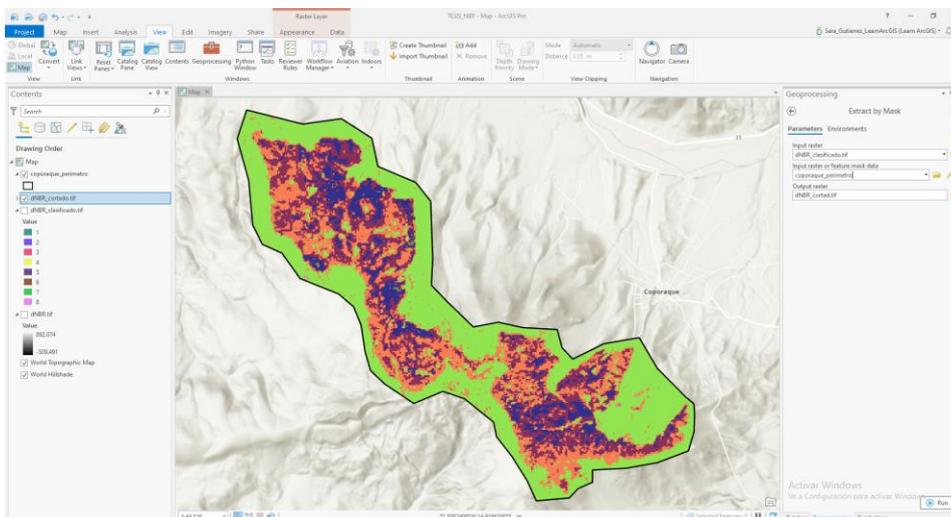
**Figura 37**

*Extract by Mask*



**Figura 38**

*Resultado del geoprocreso*

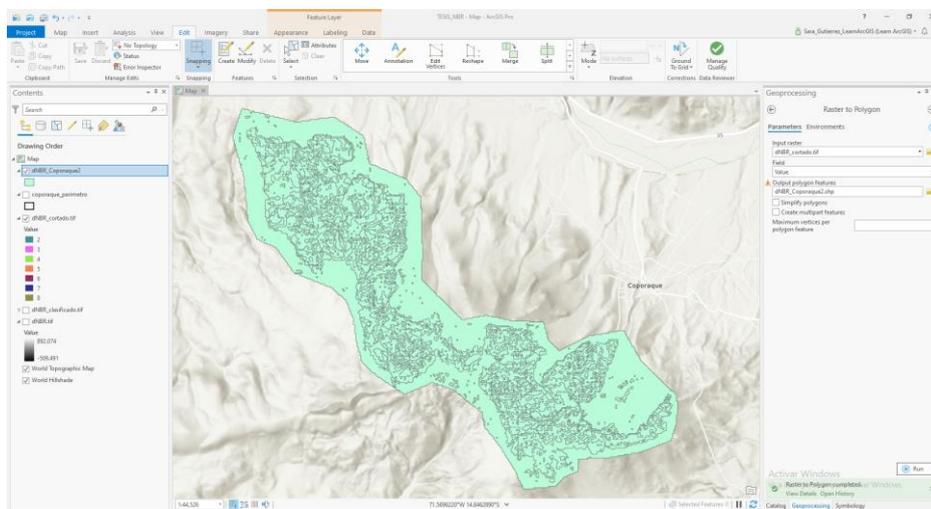


### 4.5.3. Conversión de Ráster a Shapefile

Tras obtener el área del incendio cortada en formato .tif, se procedió a convertirlo en polígono, en formato .shp (Figura 39). El proceso realizado se encuentra en ArcToolbox -> Conversion Tools -> From Raster -> “Raster to Polygon” dentro del ArcGIS Pro. Luego de esto, se realizó la simbología por colores dándonos como resultado la Figura 40.

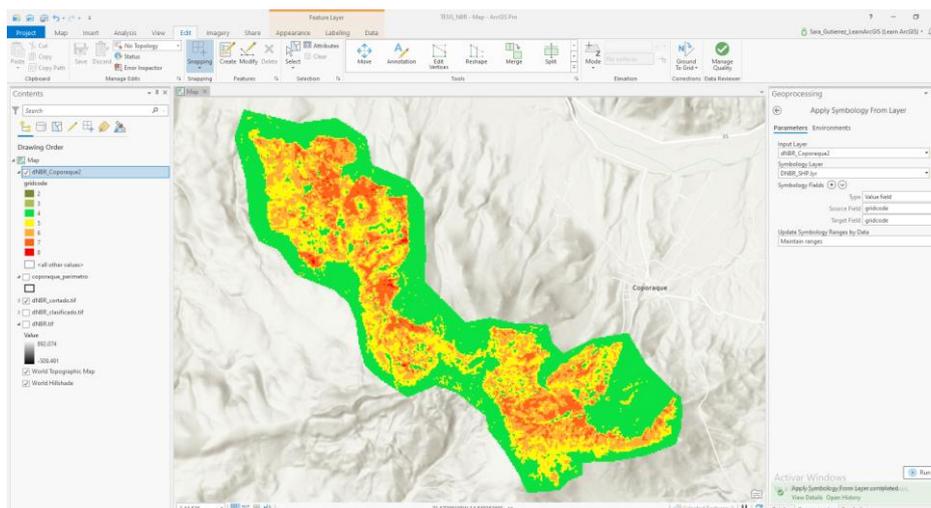
**Figura 39**

*Conversión de ráster a polígono*



**Figura 40**

*Resultado de la conversión y simbología por colores*

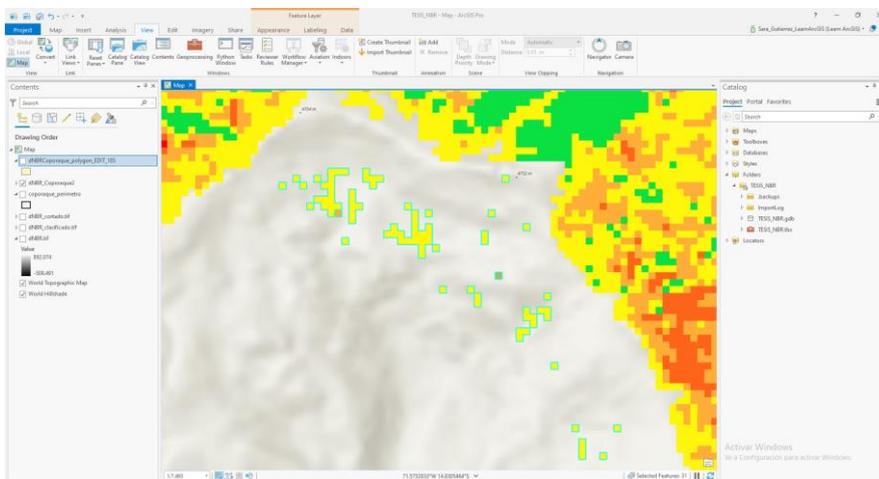


#### 4.5.4. Edición del área de incendio (polígono)

Teniendo el área del incendio en formato .shp, procedimos a editar lo que no corresponde directamente al incendio, es decir la mayoría de los píxeles que se encuentran a una distancia lejana del incendio se eliminan. Por ejemplo, como se puede ver en la Figura 41 existen polígonos a una distancia aproximada entre 300 a 500 metros del evento. El resultado se observa en la Figura 42.

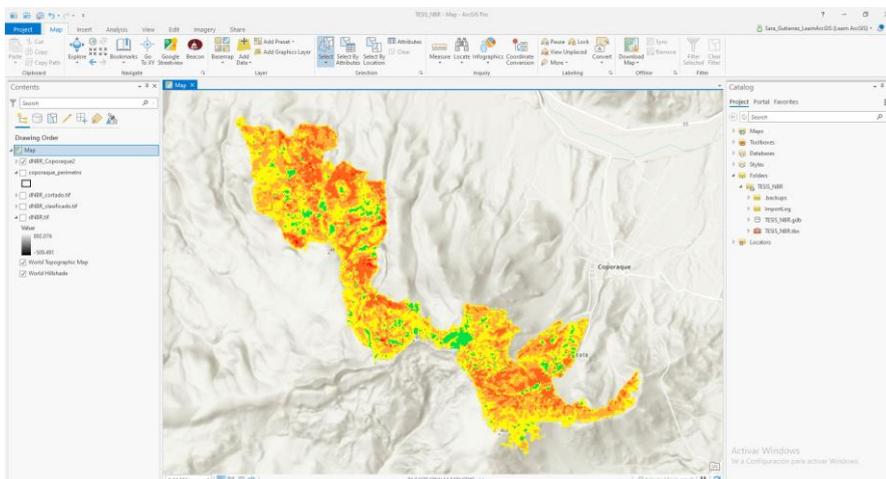
**Figura 41**

*Edición de polígonos*



**Figura 42**

*Resultado de la edición de polígonos*



#### 4.5.5. Niveles de severidad de los incendios forestales

Luego de la edición de toda el área del incendio ocurrido en el distrito de Coporaque, se estimó la severidad de las áreas afectadas por el incendio forestal. Primero se proyectó el shapefile al DATUM WGS84, Zona 19 (zona que corresponde al área afectada en Coporaque). Determinando así el área en hectáreas y el porcentaje por cada nivel de severidad (ver Tabla 14). Cabe mencionar que en el área afectada no se identificó el tipo de severidad “Alto recrecimiento post-fuego” (con valores de -500 a -251).

**Tabla 14**

*Evaluación de la severidad del gran incendio en Coporaque*

$\Delta$ dNBR (escalado)		NIVEL DE SEVERIDAD	ÁREA (Ha)	%
-250 a -101		Bajo crecimiento post-fuego	0.17	0.01
-100 a +99		No quemado	108.08	5.56
+100 a +269		Quemadura de Severidad Baja	790.83	40.66
+270 a +439		Severidad Moderada - Baja	733.34	37.7
+440 a +659		Severidad Moderada - Alta	306.83	15.77
+660 a +1300		Quemadura de Severidad Alta	5.89	0.3
<b>TOTAL</b>			<b>1,945.14</b>	<b>100</b>

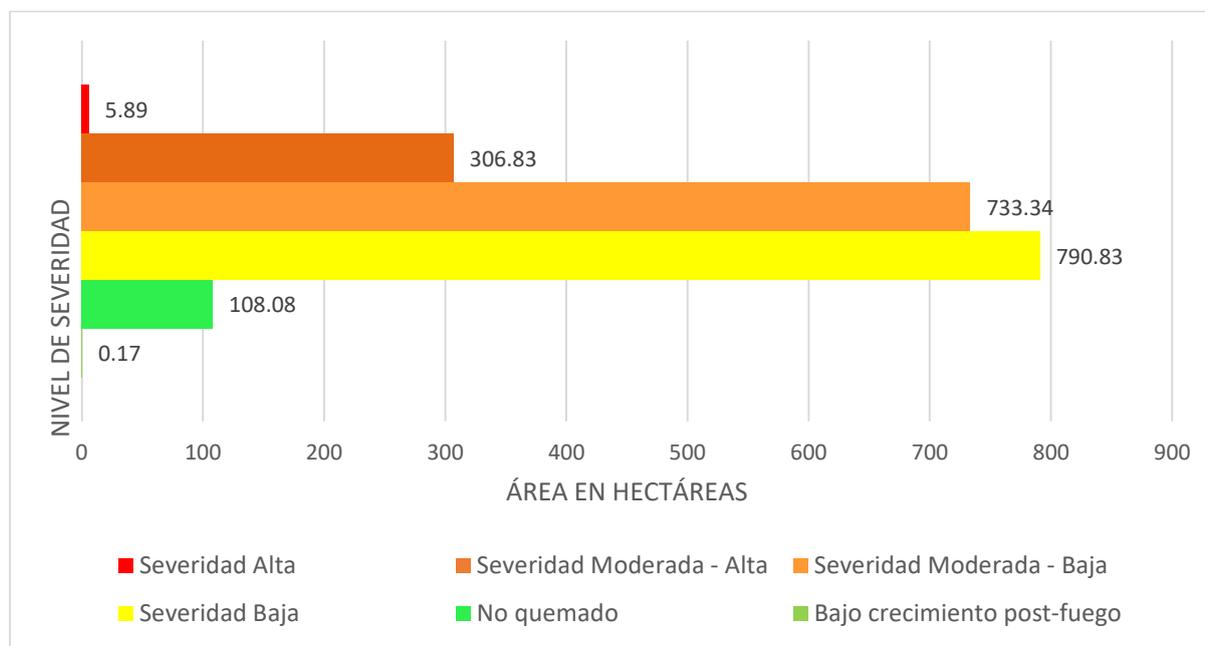
*Nota.* Elaboración propia.

Se puede apreciar en las Figuras 43 y 44 que el área evaluada por los niveles de severidad tuvo un total de 1,945.14 Ha y el área quemada del incendio ocurrido en el distrito de Coporaque, provincia de Espinar, departamento de Cusco fue de 1,836.89 Ha. Presentando en su mayoría zonas quemadas con un nivel de Severidad Baja (área de 790.83 Ha, que equivale al 40.66% del área evaluada); seguido del nivel Severidad Moderada – Baja con un área de 733.34 Ha, que representa un 37.7% del área evaluada. Además, el nivel de severidad Moderada - Alta con 306.83 Ha, que representa un 15.77% del total, mientras que 5.89 Ha pertenece a zonas quemadas con Severidad Alta (un 0.3% del área evaluada). Por otro lado, la evaluación de la severidad del incendio también determinó zonas sin cobertura vegetal o áreas

que no han sido quemadas, con un área total de 108.08 Ha (5.56% del área evaluada) y áreas con Bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego de 0.17 Ha (0.01% del área evaluada).

**Figura 43**

*Áreas quemadas respecto a la severidad del incendio*

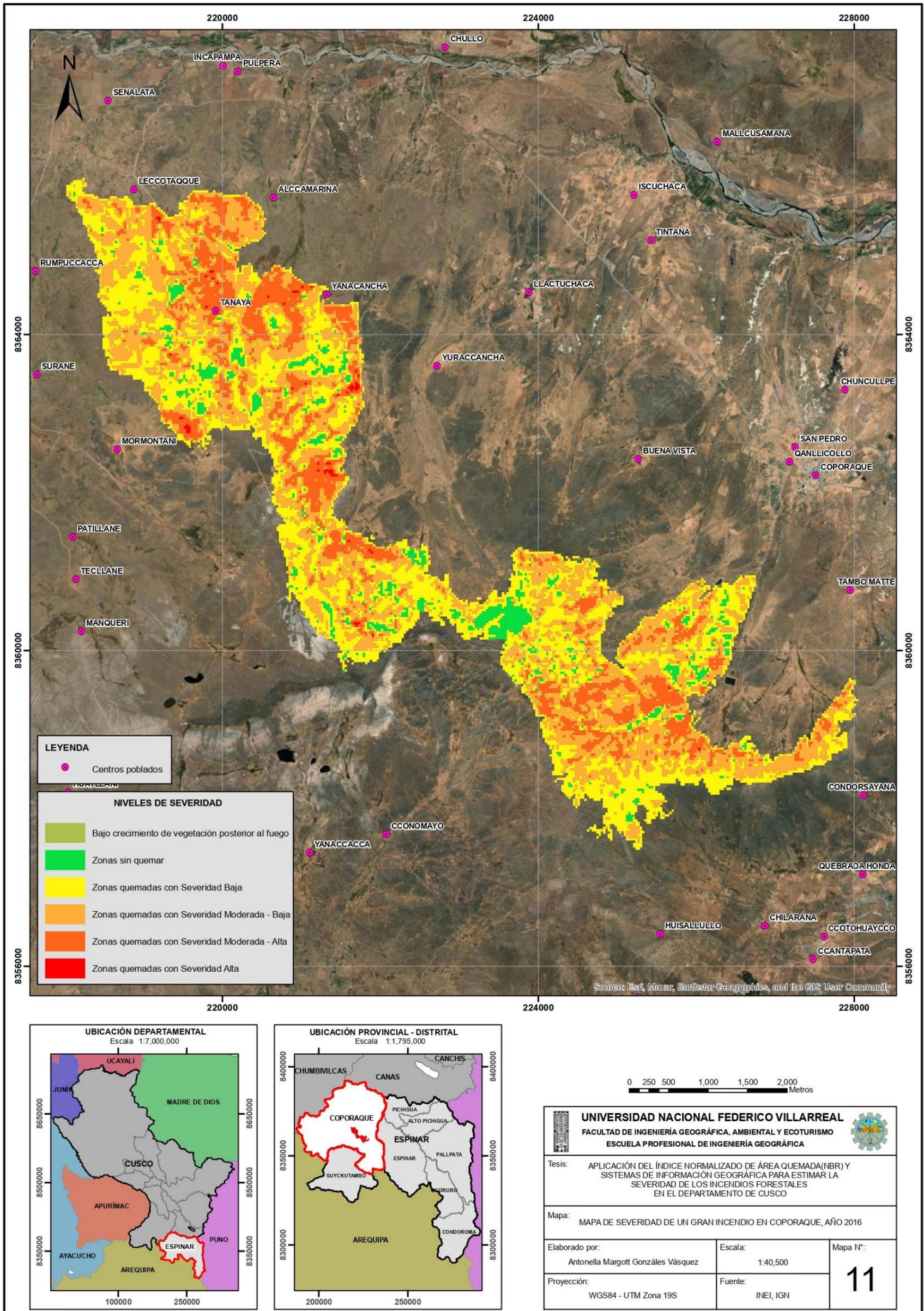


*Nota.* Elaboración propia.

A consecuencia del gran incendio forestal en el distrito de Coporaque, quedaron afectados pastos naturales, viviendas y animales en las comunidades de Ccamanocca, Totorita Alta y Apachillanca. Aproximadamente 16 familias (48 personas) afectadas, 121 familias (335 personas) damnificadas, 16 viviendas de material adobe inhabitable, 135 vacunos, 10 caballar, 3196 auquénidos, 2070 ovinos y 20 aves afectados, 1 vacuno y 1 caballar perdido (INDECI, s.f.). Respecto a los ecosistemas naturales afectados fueron pajonales de puna seca y bofedal; esto trae consigo la reducción de sus servicios ecosistémicos como la de regulación hídrica, siendo muy importante para la recolección, almacenamiento y suministro del agua (Mosquera et al., 2022).

Figura 44

Mapa de severidad de un gran incendio ocurrido en Coporaque, año 2016



## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La presente investigación tuvo como objetivo principal aplicar el índice Normalizado de área quemada (NBR) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar la severidad de los incendios forestales en el departamento Cusco. Mediante el uso de la diferencia del índice espectral NBR (dNBR) de imágenes satelitales Landsat 8 (pre y post incendio) en Google Earth Engine y el análisis con el software ArcGIS Pro, obteniéndose el grado de severidad de un gran incendio ocurrido en el año 2016 en el distrito de Coporaque, provincia de Espinar, Cusco; donde el área quemada total fue de 1,836.89 Ha, presentando en su mayoría un nivel de Severidad Baja de 790.83 Ha (equivalente al 43% del área quemada), seguido del nivel de Severidad Moderada – Baja con un área de 733.34 Ha (representando un 40% del área quemada).

En el artículo realizado por Añamuro et al. (2020) cuyo objetivo fue estimar el área quemada y la severidad ocasionada por un incendio en el distrito de Macarí – Puno en el año 2016, obtuvo un área quemada de 2458.672 Ha. Logrando determinar que el incendio en su mayoría fue de una Severidad Baja, siendo de un área aproximada de 1385.145 Ha; seguida de una severidad media de 967.568 Ha. Lo cual indica que siguiendo la metodología a través de la aplicación del NBR y su diferencia dNBR podemos estimar adecuadamente el área quemada y la severidad ocasionada por un incendio. Sin embargo, en este artículo descargan las imágenes Landsat 8 a utilizar, siendo estas muy pesadas (mayores a 1 GB); mientras que en el presente estudio no se descarga ninguna imagen satelital solo se trabaja en la nube de Google Earth Engine. Además, utilizan el producto MCD45A1 de MODIS para determinar la ubicación y fecha aproximada de una quema, mientras que en este estudio se tiene la ubicación y la fecha de los incendios históricos descargados del geoservidor del MINAM en formato .shp.

Asimismo, en la investigación de Rodríguez y Ríos (2017) cuyo objetivo fue identificar las áreas quemadas por incendios forestales (cicatrices) para el año 2016 en el departamento

del Meta (Colombia), a través del procesamiento de imágenes satelitales; obtuvo como resultado 467986.57 ha afectadas por 5817 polígonos de cicatrices o incendios en el 2016. Recalcando que el NBR, entre los diferentes índices espectrales, muestra su alta potencialidad para discriminar superficies afectadas por incendios forestales frente a otras cubiertas que no presentan daños (Key y Benson, 1999; Miller y Yool, 2002; como es citado en Rodríguez y Ríos, 2017). Además, en caso de incendios de difícil acceso se hace evidente utilizar datos proporcionados por sensores satelitales para estimar superficies quemadas, ya que determinan buenas aproximaciones a las áreas afectadas, aportando datos de calidad para un adecuado registro estadístico y posibilitando el análisis de la evolución de las superficies quemadas, la planificación y medición de la efectividad de los programas de prevención a través del tiempo.

Para Lara (2017), cuyo objetivo fue analizar espacial y multitemporalmente las cicatrices de quemas mediante un algoritmo de teledetección de árbol de decisiones, obtuvo como resultado una superficie total de quemas en bosque de 9.287 ha para la provincia Cordillera (departamento de Santa Cruz, Bolivia), las quemas en otras coberturas de 35.743 ha y en total sumaron 45.030 ha. Este estudio usó diferente metodología, un algoritmo de Árbol de Decisiones para la clasificación de quema; sin embargo, estos resultados presentaron un nivel de coincidencia regular con respecto a las quemas identificadas por las instituciones públicas y se deben tomar solo como datos auxiliares no oficiales. Asimismo, recomiendan desarrollar nuevos algoritmos de clasificación, ya que el algoritmo fue diseñado para bosques amazónicos y sus resultados fueron regulares.

## VI. CONCLUSIONES

6.1 Se realizó el diagnóstico de las variables físicas y biológicas del departamento de Cusco, obteniéndose que el clima más extenso se ubica en la serranía, el cual es lluvioso con deficiencia de humedad en otoño e invierno, y es templado, B(o,i)C'. En relación a la hidrografía, cuenta con 7 unidades hidrográficas, de los cuales la cuenca Urubamba es la que presenta mayor extensión, contiendo a los ríos principales: Vilcanota – Urubamba y a las lagunas sobresalientes: Sibinacocha, Pomacanchi y Langui-Layo; seguida de la intercuenca Alto Apurímac, que contiene al río principal Apurímac. Respecto a la geología, litológicamente, consta en su mayoría de rocas paleozoicas que pasan gradualmente de la cordillera hacia faja subandina donde el mayor predominio lo conforman rocas del paleozoico e intrusivos granitoides que afloran cerca del 11 % de la superficie regional. La geomorfología, se caracteriza por relieves montañoso y abrupto, ya que el 32% de la superficie de Cusco está constituida por vertientes de montaña empinada (pendientes entre 25 – 50 %) y el 29% constituye vertientes de montaña disectada empinada a escarpada (pendientes superiores al 50%). Los suelos predominantes en Cusco son: Maingo Misceláneo con un 26%, después está Pomacanchis con un 20% y Saniriato con un 11%. Referente a la capacidad de uso mayor de suelos, el mayor porcentaje es para las tierras de Protección (57% del total), el mayor potencial de suelos está referido a los de Pastoreo, que en sus diferentes calidades y asociaciones representa el 16.22% de la superficie regional. En cuanto al tipo de cobertura vegetal que presenta mayor área, es el Pajonal andino con un 31%, seguido del Bosque de montaña basimontano con un 13% del total. Por último, sobre los tipos de ecosistemas más predominantes: Pajonal de puna húmeda con un 25%, seguido del Bosque montano de Yunga con un 12% del total y el Bosque basimontano de Yunga con un 11%.

6.2 Se analizó la distribución espacial y temporal de las ocurrencias de incendios forestales (IF) a nivel nacional y del departamento de Cusco, obteniéndose en primera instancia que a nivel nacional entre los años 2000 al 2021 se tuvo un total de 18 315 eventos de incendios. Los años 2005, 2010 y 2016 presentaron mayores ocurrencias de IF a nivel nacional; este incremento severo se podría relacionar al periodo de estiaje e inicio de la temporada de lluvias entre agosto y noviembre (temporada seca, donde el fuego es utilizado en el manejo de prácticas agropecuarias y cambios de uso del suelo), a un retraso en el inicio de las lluvias en los Andes o periodos de sequía extrema en la Amazonía. También, existe un incremento exponencial de incidencia de los incendios forestales para los años 2019, 2020 y 2021; posiblemente este incremento se deba a una mayor accesibilidad a nuevos recursos tecnológicos de geolocalización de estas cicatrices. Cusco, es uno de los departamentos más afectados por los incendios forestales a nivel nacional, presentando históricamente 2 990 eventos mapeados desde los años 2000 al 2021. Donde sus provincias más afectadas son La Convención (22.2%), Anta (9.5%), Calca (9.3%), Chumbivilcas (8.4%), Paucartambo (8.3%) y Espinar (8%). Finalmente, analizando los incendios forestales a nivel de la provincia de Espinar (241 registros), se tiene que el distrito de Coporaque presenta mayor incidencia de estas ocurrencias, con un total de 95 eventos (casi el 40% a nivel de toda la provincia).

6.3 Se estimó los niveles de severidad de un gran incendio forestal ocurrido en Cusco, provincia de Espinar, distrito de Coporaque, con el índice NBR y Sistemas de Información Geográfica. El área evaluada total fue de 1,945.14 Ha. Respecto a las áreas quemadas del incendio forestal asciende a 1,836.89 Ha, presentando en su mayoría zonas quemadas con un nivel de Severidad Baja de 790.83 Ha (equivale al 40.66% del área evaluada), seguido del nivel de severidad Moderada – Baja con un área de 733.34 Ha (representa un 37.7% del área evaluada). Además, el nivel de severidad Moderada -

Alta con 306.83 Ha (15.77% del total), mientras que 5.89 Ha pertenece a zonas quemadas con Severidad Alta (un 0.3% del total). Por otro lado, la estimación de la severidad del incendio también determinó zonas sin cobertura vegetal o áreas que no han sido quemadas, con un área total de 108.08 Ha (5.56% del área total) y áreas con Bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego de 0.17 Ha (0.01% del área evaluada). Estas áreas incendiadas dañan a familias y sus materiales físicos, fauna, ecosistemas naturales, sus servicios ecosistémicos; siendo en general el incendio forestal un grave problema a nivel local, regional, nacional y mundial que debe tomarse con mayor consideración.

## VII. RECOMENDACIONES

- 7.1 Se recomienda que se tenga actualizada los geoportales de las entidades públicas, que se encuentran en la Infraestructura de datos Espaciales “GEOIDEP”, pues estas difunden y brindan acceso a información geográfica y servicios de información asociados. Donde ayudan a otras entidades públicas, privadas y a la sociedad civil en general, a contar con información útil y oficial. Así poder conocer, analizar y cerrar brechas a nivel local, regional y nacional en temas de gestión territorial y gestión del riesgo de desastres.
- 7.2 Es importante que se articule la información de las diversas instituciones como MINAM, SERFOR, SINPAD de INDECI y el Gobierno Regional del Cusco en general, en temas del registro de los incendios forestales, ya que existen diversas Plataformas donde se encuentra esta información y en algunos casos no está estandarizada y/o contrastada.
- 7.3 Las instituciones del Comité técnico Regional de incendios forestales (SERFOR, la Oficina de Gestión de Riesgos y Seguridad del Gobierno Regional del Cusco, la Gerencia Regional de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente, entre otras) deben aplicar la metodología propuesta mediante la utilización de imágenes satelitales utilizando la Plataforma Google Earth Engine para evaluar las áreas afectadas por los incendios forestales, estimando su severidad y pueda servir esta información como insumo para iniciar acciones de restauración ecológica.

### VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alain, D., y Cortez, L. (2018). Investigación cuantitativa y cualitativa. En D. Alain, y L. Cortez (Ed.), *Procesos y Fundamentos de la Investigación Científica* (pp. 69-87). Universidad Técnica de Machala.  
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/14232/1/Cap.4-Investigaci%C3%B3n%20cuantitativa%20y%20cualitativa.pdf>
- Añamuro, H., Larico, C., Ruiz, C., Monteza, O., y Quiñonez, J. (2020). Análisis de incendios forestales en pajonales andinos utilizando Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, Macari – Puno. *EL CEPROSIMAD*, 8(2), pp. 30-37.  
<https://journal.ceprosimad.com/index.php/ceprosimad/article/view/110>
- Arellano, S., Vega, J., Rodríguez y Silva, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J., Ruiz-González, A. (2017). Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de teledetección*, (49), pp. 49-61.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6226391>
- Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <https://www.unspider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Ariza, A. (2017). *Análisis de los cambios en la estructura del paisaje por incendios forestales mediante teledetección*. [Tesis de doctorado, Universidad de Alcalá]. Repositorio Institucional UAH. <http://hdl.handle.net/10017/37276>
- Bilbao, B., Steil, L., Urbietta, I., Anderson, L., Pinto, C., Gonzalez, M., Millán, A., Falleiro, R., Morici, E., Ibarnegaray, V., Pérez-Salicrup, D., Pereira, J., Moreno, J. (2020). Incendios forestales. En J. Moreno, C. Laguna-Defior, V. Barros, E. Calvo, J. Marengo y U. Spring (Eds.), *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países*

*iberoamericanos – Informe RIOCCADAPT* (pp. 459-524). McGraw-Hill.

[https://www.academia.edu/43579778/Incendios\\_forestales](https://www.academia.edu/43579778/Incendios_forestales)

Borini, D. (2018). *Series multitemporales Landsat/MODIS en el análisis de áreas quemadas en ambientes de Sabana Tropical de la Amazonía Meridional Brasileña*. [Tesis de doctorado, Universidad de Zaragoza]. Repositorio Institucional UNIZAR.  
<https://zaguan.unizar.es/record/75758?ln=es>

Campo, Á., y Bernal, F. (2010). Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal. *El Hombre y la Máquina*, (35), pp. 67-81. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47817140008>

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres [CENEPRED]. (2020). *Escenario de riesgo por incendios forestales*.  
[http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//10471\\_escenario-de-riesgo-por-incendios-forestales.pdf](http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//10471_escenario-de-riesgo-por-incendios-forestales.pdf)

Chin, S. (2014). Satellite detection of forest fires and burn scars. *Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP) National University of Singapore*, pp. 34-46.  
[https://www.researchgate.net/publication/228935625\\_6\\_Satellite\\_detection\\_of\\_forest\\_fires\\_and\\_burn\\_scars](https://www.researchgate.net/publication/228935625_6_Satellite_detection_of_forest_fires_and_burn_scars)

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de la teledetección espacial*. (2ª ed.). Ediciones RIALP S.A.  
<http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist.%20Cart.%20y%20Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. (3ª ed. actualizada). Ariel S.A.  
<https://siglibreuruguay.wordpress.com/2016/09/01/libro-gratuito-teledeteccion-ambiental-la-observacion-de-la-tierra-desde-el-espacio-de-emilio-chuvieco/>

Chuvieco, E., y Martín, M. (2001). Propuesta de un nuevo índice para cartografía de áreas quemadas: aplicación a imágenes NOAA AVHRR y Landsat-TM. *Revista de Teledetección*, (16), pp. 57-64. <http://www.aet.org.es/?q=revista16-10>

Constitución Política del Perú [Const]. Art. 66, 29 de diciembre de 1993 (Perú).

Corral, Y., Corral, I., y Corral, A. (2015). Procedimientos de muestreo. *Revista Ciencias de la Educación de la Universidad de Carabobo*, (46), pp. 151-167. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7472483>

Cruz V. y Moreno A. (2012). Estudios transversales. En A. Villa, L. Moreno, y G. García (Eds.), *Epidemiología y Estadística en la Salud Pública*. McGraw-Hill. <https://accessmedicina.mhmedical.com/book.aspx?bookID=1464>

Decreto Legislativo N.º 1237 - 2015. (26 de setiembre de 2015). <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-legislativo-que-modifica-el-codigo-penal-aprobado-decreto-legislativo-n-1237-1292707-7>

Decreto Supremo N.º 009-2013-MINAGRI. Decreto Supremo que aprueba la Política Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (14 de agosto de 2013). <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-aprueba-la-politica-nacional-forestal-y-decreto-supremo-n-009-2013-minagri-974599-2/>

Decreto Supremo N.º 012-2009-MINAM. Decreto Supremo que aprueba la Política Nacional del Ambiente. (22 de mayo de 2009). [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/BE42236022AD446305257B8300651A93/\\$FILE/DS\\_012-2009\\_MINAM.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/BE42236022AD446305257B8300651A93/$FILE/DS_012-2009_MINAM.pdf)

Decreto Supremo N.º 016-2012-AG. Aprueban Reglamento de Manejo de los Residuos Sólidos del Sector Agrario. (14 de noviembre de 2012). [https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normaslegales/decretossupremos/2012/ds\\_16-2012-ag.pdf](https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normaslegales/decretossupremos/2012/ds_16-2012-ag.pdf)

- Domínguez, J. (2000). *Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas).  
[https://www.researchgate.net/publication/237467702\\_Breve\\_Introduccion\\_a\\_la\\_Cartografia\\_y\\_a\\_los\\_Sistemas\\_de\\_Informacion\\_Geografica\\_SIG](https://www.researchgate.net/publication/237467702_Breve_Introduccion_a_la_Cartografia_y_a_los_Sistemas_de_Informacion_Geografica_SIG)
- Fernández, R. (2018). *Evaluación de la superficie deforestada por efecto de los incendios forestales durante el periodo 2011 - 2016 en el distrito Las Piedras - Tambopata - Madre de Dios*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios]. Repositorio Institucional UNAMAD.  
<http://repositorio.unamad.edu.pe/handle/UNAMAD/515>
- Fuentes, H. (25 a 29 de abril de 2015). Monitoreo de Cicatrices de Quemas en el Departamento de Pando – Bolivia mediante sistemas de información geográfica y teledetección [simposio]. *Análisis del XVII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa, Brasil. <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0105.pdf>
- Gobierno Regional de Cusco [Gore Cusco]. (2005). *Zonificación Ecológica y Económica Departamento del Cusco*. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/zonificacion-ecologica-economica-zee-departamento-cusco>
- Gobierno Regional de Cusco [Gore Cusco]. (2016). *Plan de Desarrollo Concertado Cusco al 2021 con prospectiva al 2030*. <https://transparencia.regioncusco.gob.pe/public/Plan-de-Desarrollo-Regional-Local-Concertado>
- Google Earth. (s.f.). *Análisis a nivel planetario en la nube de Google*. [https://www.google.com/intl/es\\_in/earth/education/tools/google-earth-engine/](https://www.google.com/intl/es_in/earth/education/tools/google-earth-engine/)
- Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI]. (s.f.). SINPAD Versión antigua. Recuperado el 24 de mayo de 2022 de <http://sinpad.indeci.gob.pe/PortalSINPAD/>

- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (1996). Cusco: Aspectos Geográficos.  
 En INEI (Ed.), *Población Mujer y Salud Cusco*.  
<http://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0249/CAP0104.HTM>
- Jimenez, A. y García, A. (2020). *Resiliencia de la cobertura vegetal post incendio forestal aplicando índices espectrales de vegetación – Distrito de Chulucanas – Departamento de Piura, 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Tumbes]. Repositorio Institucional UNTUMBES.  
<http://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/1884>
- Khorram, S., Koch, F., Van der Wiele, C., y Nelson, S. (2012). *Remote Sensing*. Springer.  
[https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=QpdQut59MPsC&oi=fnd&pg=PR5&dq=remote+sensing&ots=iY5doKr88n&sig=VTM6bwuvvViCsfdI0HYq9\\_gJS0g&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=QpdQut59MPsC&oi=fnd&pg=PR5&dq=remote+sensing&ots=iY5doKr88n&sig=VTM6bwuvvViCsfdI0HYq9_gJS0g&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Labrador, M., Évora, J., y Arbelo, M. (2012). *Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio*. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.  
[https://www.researchgate.net/publication/259230060\\_Satelites\\_de\\_teledeteccion\\_para\\_la\\_gestion\\_del\\_territorio](https://www.researchgate.net/publication/259230060_Satelites_de_teledeteccion_para_la_gestion_del_territorio)
- Lara, P. (2017). *Análisis multitemporal de cicatrices de quemas en bosques durante el periodo 2009 a 2014 en la Provincia Cordillera, Santa Cruz, Bolivia*. [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Gabriel René Moreno]. Repositorio Institucional UAGRM.  
<https://forestaluagrm.com/wp-content/uploads/2019/05/Lara-Pablo.2017.An%C3%A1lisis-multitemporal-de-cicatrices-de-quemas-en-bosques-durante-el-periodo-2009-a-2014-en-la-provincia-Cordillera-Santa-Cruz-Bolivia.pdf>
- Lau, J. (2017). *Utilización del índice meteorológico de incendios forestales (fire weather index) en el departamento de Cusco*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La

Molina]. Repositorio Institucional UNALM.

<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3325>

Ley N.º 27783-2001. Ley de bases de la descentralización. (17 de julio de 2002). Congreso de la República del Perú.

[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/8B3C23D0EB9643D605257FD400782856/\\$FILE/27783.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/8B3C23D0EB9643D605257FD400782856/$FILE/27783.pdf)

Ley N.º 28611-2005. Ley General del Ambiente. (15 de octubre de 2005). Congreso de la República del Perú. <https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/28611.pdf>

Luque, J. (2012). Espectro electromagnético y especto radioeléctrico. *Autores Científico-Técnicos y Académicos*, (62), pp. 17-31.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5738106>

Malpartida, R. (2016). *Riesgo a incendios forestales en la provincia de Satipo - Junín*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3471>

Mansanet, C. (1987). *Incendios forestales en Alicante. Estudio de la evolución de la vegetación quemada*. de Ahorros Provincial de Alicante.

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2014). *Estrategia Nacional de Diversidad Biológica al 2021. Plan de Acción 2014 - 2018*. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/estrategia-nacional-diversidad-biologica-2021-plan-accion-2014-2018>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2015). *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal. Memoria descriptiva*.

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2019a). *Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú: Memoria Descriptiva*. <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2019b). *Resumen Ejecutivo: Registro histórico de incendios sobre la cobertura vegetal a nivel nacional*.  
<https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/64055>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (13 de junio de 2019c). *Pérdida de la cobertura vegetal en ecosistemas costeros y andinos*. <https://sinia.minam.gob.pe/indicadores/perdida-cobertura-vegetal-ecosistemas-costeros-andinos#:~:text=La%20cobertura%20vegetal%20puede%20ser,%C3%A1reas%20cubiertas%20por%20bosques%20naturales>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (s.f.). *Servicio CFOI*.  
<https://geoservidor.minam.gob.pe/monitoreo-y-evaluacion/cfoi/>

Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2014). *Cartilla Prevención de incendios forestales*. <https://docplayer.es/24909118-Cartilla-prevencion-de-incendios-forestales.html>

Mosquera G., Marín F., Stern M., Bonnesoeur V., Ochoa-Tocachi B., Román-Dañobeytia F. (2022). *Servicios ecosistémicos hídricos de los pajonales altoandinos ¿Qué sabemos?*. Forest Trends. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2022/02/Servicios-ecosistemicos-hidricos-de-los-pajonales-altoandinos-Que-sabemos.pdf>

National Geographic. (05 de Setiembre de 2010). *¿Qué es un incendio forestal?*.  
<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/incendios>

Navazo, G., Nieto, A., y Moreno, G. (2016). Análisis de incendios forestales mediante Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Estudio de caso en Sierra de Gata (2015). En A. Nieto (Ed.), *Tecnologías de la Información Geográfica en el análisis espacial. Aplicaciones en los Sectores Público, Empresarial y Universitario* (pp. 247-268). Grupo de Investigación Geo-Ambiental de la Universidad de Extremadura.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5776243>

- Nieto, A., García, C., y Fernández, A. (2011). Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LandsatT TM 5: Emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales. *GeoFocus. Revista Internacional De Ciencia Y Tecnología De La Información Geográfica*, (11), pp. 375-408. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/233>
- Ordenanza Regional N.º 092-2015-CR-GRC/CUSCO. (20 de agosto de 2015). <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/733346/275915890805186469820200525-26773-ne35bg.pdf>
- Ordenanza Regional N.º 139-2018-CR/GRC.CUSCO. (12 de octubre de 2018). <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/modifican-el-articulo-primero-y-segundo-de-la-ordenanza-regi-ordenanza-no-139-2018-crgccusco-1700414-1>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (1992). *Convenio sobre la diversidad biológica*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/convenio-diversidad-biologica>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (s.f.). *Índice Normalizado de Área Quemada (NBR)*. <https://un-spider.org/es/node/10959>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2007). *Manejo del Fuego: principios y acciones estratégicas. Directrices de carácter voluntario para el manejo del fuego*. <http://www.fao.org/3/j9255s/j9255s00.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2011). *Evaluación del sistema de manejo de fuego en la Región Autónoma del Atlántico Norte (RAAN) en Nicaragua después del huracán Félix*. <https://www.fao.org/3/am333s/am333s00.pdf>
- Padarian, J., Minasny, B., y McBratney, A. (2015). Using Google's cloud-based platform for digital soil mapping. *Computers & Geosciences*, 83, pp. 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.06.023>

Pérez, C., y Muñoz, Á. (2006). *Teledetección. Nociones y Aplicaciones*. Universidad de Salamanca.

<https://books.google.es/books?id=SfrGxbO1DT0C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=true>

Pérez, D. (2007). *Introducción a los sensores remotos - Aplicaciones en geología*.

<https://es.scribd.com/document/267140654/Sensores-Remotos-PDF>

Petropoulos, G., Griffiths, H., y Kalivas, D. (2014). Quantifying spatial and temporal vegetation recovery dynamics following a wildfire event in a Mediterranean landscape using EO data and GIS. *Applied Geography*, (50), pp. 120-131.

<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.02.006>

Rodas, M. (2015). *Análisis del comportamiento de incendios forestales en la cuenca del río Paute mediante sensores remotos*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca].

Repositorio

Institucional

UCUENCA.

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/22325>

Rodríguez, A. (2012). Cartografía multitemporal de quemas e incendios forestales en Bolivia: Detección y validación post-incendio. *Ecología en Bolivia*, 47(1), pp. 53-71.

[https://www.researchgate.net/publication/230641492\\_Cartografia\\_multitemporal\\_de\\_quemas\\_e\\_incendios\\_forestales\\_en\\_Bolivia\\_Deteccion\\_y\\_validacion\\_post-incendio](https://www.researchgate.net/publication/230641492_Cartografia_multitemporal_de_quemas_e_incendios_forestales_en_Bolivia_Deteccion_y_validacion_post-incendio)  
[Multitemporal mapping forest fires and burn in Bolivia detection and post-fire validation](https://www.researchgate.net/publication/230641492_Cartografia_multitemporal_de_quemas_e_incendios_forestales_en_Bolivia_Deteccion_y_validacion_post-incendio)

Rodríguez, L., y Ríos, J. (2017). *Identificación de áreas quemadas por incendios forestales en el departamento del Meta y determinación de medidas de intervención para su reducción*. [Trabajo de pregrado de especialización, Universidad Católica de

Manizales].

Repositorio

Institucional

UCM.

<https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/1861/1/Lina%20Roci%C3%B3%20Rodr%C3%ADguez%20Beltr%C3%A1n.pdf>

Rojas, M. (2015). Tipos de Investigación científica: Una simplificación de la complicada incoherente nomenclatura y clasificación. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 16 (1), pp. 1-14. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63638739004>

Santos, J. (2004). *Sistemas de Información Geográfica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

<https://books.google.com.pe/books?id=xjbeDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Servicio Geológico de Estados Unidos [USGS]. (s.f.). *Landsat 8. Explore research, stories, and images featuring the satellites*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (2021). *Climas del Perú - Mapa de Clasificación Climática Nacional*. (1ª ed.). <https://idesep.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/9f18b911-64af-4e6b-bbef-272bb20195e4>

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR]. (2015). *Ley Forestal y de Fauna Silvestre N° 29763-2012 y sus Reglamentos*. (2ª ed.). WWF Perú.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR]. (2018). *Plan de Prevención y Reducción de Riesgos de Incendios Forestales*. <https://www.serfor.gob.pe/portal/wp-content/uploads/2018/12/Plan-de-prevenci%C3%B3n-y-reducci%C3%B3n-de-riesgos-de-incendios-forestales.pdf>

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR]. (25 de marzo de 2022). *Prevenir un incendio forestal cuesta menos que combatirlo*. <https://www.gob.pe/institucion/serfor/campa%C3%B1as/1784-prevenir-un-incendio-forestal-cuesta-menos-que-combatirlo>

Zubieta, R., Prudencio, F., Alarco, G. y Reupo, J. (2019). Ocurrencia de incendios forestales en el Perú durante eventos El Niño. *Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, 6(5), pp. 5-9.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12816/4704>

## II. ANEXOS

### Anexo A Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p><b>GENERAL:</b> ¿De qué manera la aplicación del índice normalizado de área quemada (NBR) y los Sistemas de Información Geográfica estimarán la severidad de los incendios forestales en el departamento de Cusco?</p> <p><b>ESPECÍFICOS:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cómo se realizaría un diagnóstico de las variables físicas y biológicas del departamento de Cusco?</li> <li>• ¿Cómo se analizaría la distribución espacial y temporal de las ocurrencias de incendios forestales a nivel nacional y del departamento de Cusco?</li> <li>• ¿Cómo se podría estimar la severidad de un gran incendio forestal ocurrido en el departamento de Cusco?</li> </ul>	<p><b>GENERAL:</b> Aplicar el índice normalizado de área quemada (NBR) y Sistemas de Información Geográfica para estimar la severidad de los incendios forestales en el departamento Cusco.</p> <p><b>ESPECÍFICOS:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar un diagnóstico de las variables físicas y biológicas del departamento de Cusco.</li> <li>• Analizar la distribución espacial y temporal de las ocurrencias de incendios forestales a nivel nacional y del departamento de Cusco.</li> <li>• Estimar los niveles de severidad de un gran incendio forestal ocurridos en Cusco.</li> </ul>	<p><b>GENERAL:</b> Aplicando el índice normalizado de área quemada (NBR) y Sistemas de Información Geográfica se estima la severidad de los incendios forestales en Cusco.</p>	<p><b>DEPENDIENTE:</b> Grado de Severidad de los incendios forestales aplicando índice de NBR y Sistemas de Información Geográfica.</p> <p><b>INDEPENDIENTE:</b> Incendios forestales en el departamento de Cusco.</p> <p><b>Dimensiones:</b></p> <p><b>a) Variables físicas:</b> <i>Indicadores</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipos de clima</li> <li>- Unidad hidrográfica</li> <li>- Unidad geológica</li> <li>- Unidad geomorfológica</li> <li>- Tipo de suelo</li> <li>- Tipo de CUM</li> </ul>	<p><b>TIPO:</b> Enfoque: Cuantitativo Nivel: Descriptivo Diseño: Transversal</p>

**b) Variables biológicas:*****Indicadores***

- Tipo de cobertura vegetal
- Tipo de ecosistema

**c) Distribución espacial y temporal de las ocurrencias de incendios:*****Indicador***

Número, Año y lugar de los incendios forestales

**d) Evaluación de la severidad de incendios*****Indicador***

Valores del dNBR (-500 a +1300)

---

## Anexo B Características del Dataset de las imágenes satelitales usadas

Característica	Descripción
<b>Disponibilidad del Dataset</b>	2013-03-18T15:59:02Z–2021-12-31T23:25:37
<b>Proveedor del Dataset</b>	Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)
<b>Colección de Earth Engine</b>	ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_SR")
<b>Tipo de correcciones que cuenta el Dataset</b>	<p>Este dataset es la reflectancia superficial corregida atmosféricamente de los sensores Landsat 8 OLI/TIRS. Estas imágenes contienen 5 bandas visibles e infrarrojas cercanas (VNIR) y 2 bandas infrarrojas de onda corta (SWIR) procesadas a reflectancia superficial ortorrectificada, y dos bandas infrarrojas térmicas (TIR) procesadas a temperatura de brillo ortorrectificada.</p> <p>Este Dataset ha sido corregido atmosféricamente con LaSRC e incluyen una máscara de nubes, sombras, agua y nieve producida con CFMASK, así como una máscara de saturación por píxel.</p> <p>Las tiras de datos recopilados se empaquetan en "escenas" superpuestas que cubren aproximadamente 170 km x 183 km utilizando una cuadrícula de referencia estandarizada .</p>

*Nota.* Información tomada del Catálogo de Datos de Google Earth Engine.

[https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LC08\\_C01\\_T1\\_SR](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_SR)

## Anexo C Script de Mapeo de severidad de incendios forestales

```
// MAPEO DE SEVERIDAD EN INCENDIOS CON EL ÍNDICE NORMALIZADO DE
// ÁREA QUEMADA (NBR)

// En esta tesis se han utilizado imágenes Landsat 8, sin embargo, también se podría utilizar
// en este script Sentinel 2.

//          1. SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

// Importar el distrito del área de estudio

//          2. CONFIGURACIÓN UN INTERVALO DE TIEMPO

// Se establece las fechas de inicio y fin de un periodo ANTES del incendio. Asegurando de
// que sea
// lo suficientemente amplio para adquirir una imagen satelital Landsat 8.
var prefire_start = '2016-07-20';
var prefire_end = '2016-08-06';

// Ahora se establece los mismos parámetros para DESPUÉS del incendio.
var postfire_start = '2016-08-07';
var postfire_end = '2016-08-18';

//          3. SELECCIÓN DE UNA PLATAFORMA DE SATÉLITE

// Seleccionar 'L8' o 'S2'.

var platform = 'L8';

//--> Hasta este punto se tienen las modificaciones necesarias en el Script <--
//---> YA SE PUEDE CORRER EL SCRIPT (RUN) <---
//----> Las modificaciones del script será de acuerdo al usuario

// Imprimir plataforma satelital y fechas para la consola
if (platform == 'S2' | platform == 'S2') {
```

```

var ImCol = 'COPERNICUS/S2';

var pl = 'Sentinel-2';

} else {

var ImCol = 'LANDSAT/LC08/C01/T1_SR';

var pl = 'Landsat 8';

}

print(ee.String('Datos seleccionados para el análisis: ').cat(pl));

print(ee.String('Incendio ocurrido entre ').cat(prefire_end).cat(' y ').cat(postfire_start));

// Localización

var area = ee.FeatureCollection(geometry);

// Selecciona el área de estudio como centro del mapa.

Map.centerObject(area);

//----- Selecciona imágenes Landsat por tiempo y ubicación -----

var imagery = ee.ImageCollection(ImCol);

// En las siguientes líneas, las imágenes se recopilarán en una ImageCollection, dependiendo
de

// la ubicación de nuestra área de estudio, un marco de tiempo determinado y la proporción de

// cobertura de nubes.

var prefireImCol = ee.ImageCollection(imagery

    .filterDate(prefire_start, prefire_end) // Filtra por fechas.

    .filterBounds(area)); // Filtrar por localización.

// Selecciona todas las imágenes que se superponen con el área de estudio en el periodo de

tiempo

// determinado, como estado posterior al incendio, seleccionamos del 07 de agosto de 2016

var postfireImCol = ee.ImageCollection(imagery

```

```

        .filterDate(postfire_start, postfire_end) // Filtrar por fechas.

        .filterBounds(area)); // Filtrar por localización.

// Agregue las imágenes recortadas a la consola
print("Colección de imágenes pre-incendio: ", prefireImCol);
print("Colección de imágenes post-incendio: ", postfireImCol);

//----- Aplicar una máscara de nubes y nieve -----

// Función para enmascarar nubes a partir de la banda de calidad de píxeles de los datos de
// la plataforma Sentinel-2 SR.
function maskS2sr(image) {

    // Los bits 10 y 11 son nubes y cirros, respectivamente.
    var cloudBitMask = ee.Number(2).pow(10).int();
    var cirrusBitMask = ee.Number(2).pow(11).int();

    // Obtenga la banda QA de control de calidad de píxeles.
    var qa = image.select('QA60');

    // Todos los indicadores deben establecerse en cero, lo que indica condiciones limpias o
    // libres de nubes.
    var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0)

        .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));

    // Devuelve la imagen enmascarada y escalada a la reflectancia TOA, sin las bandas de QA.
    return image.updateMask(mask)

        .copyProperties(image, ["system:time_start"]);
}

// Función para enmascarar nubes de la banda de calidad de píxeles de datos de Landsat 8 SR
function maskL8sr(image) {

    // Los bits 3 y 5 son nubes y sombras de nubes, respectivamente.

```

```

var cloudShadowBitMask = 1 << 3;

var cloudsBitMask = 1 << 5;

var snowBitMask = 1 << 4;

// Obtenga la banda de control de calidad de píxeles.

var qa = image.select('pixel_qa');

// Todos los indicadores deben establecerse en cero, lo que indica condiciones claras o

// libres de nubes.

var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)

    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0))

    .and(qa.bitwiseAnd(snowBitMask).eq(0));

// Devuelve la imagen enmascarada y escalada a la reflectancia TOA, sin las bandas de QA.

return image.updateMask(mask)

    .select("B[0-9]*")

    .copyProperties(image, ["system:time_start"]);
}

// Aplicar máscara de nube específica de la plataforma

if (platform == 'S2' | platform == 's2') {

    var prefire_CM_ImCol = prefireImCol.map(maskS2sr);

    var postfire_CM_ImCol = postfireImCol.map(maskS2sr);

} else {

    var prefire_CM_ImCol = prefireImCol.map(maskL8sr);

    var postfire_CM_ImCol = postfireImCol.map(maskL8sr);

}

//----- Mosaico y recorte de imágenes para el área de estudio -----

// Esto es especialmente importante si las colecciones creadas anteriormente contienen más de

```

```

// una imagen (si es solo una, el mosaico () no afecta a las imágenes).
var pre_mos = prefireImCol.mosaic().clip(area);
var post_mos = postfireImCol.mosaic().clip(area);
var pre_cm_mos = prefire_CM_ImCol.mosaic().clip(area);
var post_cm_mos = postfire_CM_ImCol.mosaic().clip(area);
// Agrega las imágenes recortadas a la consola
print("Imagen en color verdadero previa al incendio: ", pre_mos);
print("Imagen en color verdadero posterior al incendio: ", post_mos);
//----- Calcular el NBR para imágenes previas y posteriores al incendio -----
// Aplicar a la plataforma específica el NBR = (NIR-SWIR2) / (NIR+SWIR2)
if (platform == 'S2' | platform == 's2') {
    var preNBR = pre_cm_mos.normalizedDifference(['B8', 'B12']);
    var postNBR = post_cm_mos.normalizedDifference(['B8', 'B12']);
} else {
    var preNBR = pre_cm_mos.normalizedDifference(['B5', 'B7']);
    var postNBR = post_cm_mos.normalizedDifference(['B5', 'B7']);
}
//----- Calcular la diferencia entre imágenes previas y posteriores al incendio ----
// El resultado se llama diferencial NBR o dNBR
var dNBR_unscaled = preNBR.subtract(postNBR);
// Clasificación del producto a los estándares del USGS (FIREMON)
var dNBR = dNBR_unscaled.multiply(1000);
// Agregue la imagen del dNBR a la consola
print("Índice diferencial de área quemada: ", dNBR);
//
AGREGAR CAPAS AL MAPA

```

```

// Añadir el límite.

Map.addLayer(area.draw({color: 'ffffff', strokeWidth: 5}), {}, 'Área de estudio');

//----- Imágenes en color verdadero -----

// Aplicar parámetros de visualización específicos de la plataforma para imágenes en color
// verdadero.

if (platform == 'S2' | platform == 's2') {

    var vis = {bands: ['B4', 'B3', 'B2'], max: 2000, gamma: 1.5};

} else {

    var vis = {bands: ['B4', 'B3', 'B2'], min: 0, max: 4000, gamma: 1.5};

}

// Agrega las imágenes en color verdadero al mapa.

Map.addLayer(pre_mos, vis, 'Imagen previa al incendio');

Map.addLayer(post_mos, vis, 'Imagen posterior al incendio');

// Agrega las imágenes en color verdadero al mapa.

Map.addLayer(pre_cm_mos, vis, 'Imagen previa al incendio: con mascara de nubes');

Map.addLayer(post_cm_mos, vis, 'Imagen posterior al incendio: con mascara de nubes');

//----- Producto de área quemada - En escala de grises -----

var grey = ['white', 'black'];

// Visualización el NBR previo y posterior por separado.

Map.addLayer(preNBR, {min: -1, max: 1, palette: grey}, 'Prefire Normalized Burn Ratio');

Map.addLayer(postNBR, {min: -1, max: 1, palette: grey}, 'Postfire Normalized Burn Ratio');

Map.addLayer(dNBR, {min: -1000, max: 1000, palette: grey}, 'dNBR en escala de grises');

//----- Producto de severidad del incendio - Clasificación -----

// Define un estilo SLD de intervalos discretos para aplicar a la imagen (paleta de color).

var sld_intervals =

```

```

'<RasterSymbolizer>' +
'<ColorMap type="intervals" extended="false" >' +
'<ColorMapEntry color="#ffffff" quantity="-500" label="-500"/>' +
'<ColorMapEntry color="#7a8737" quantity="-250" label="-250" />' +
'<ColorMapEntry color="#acbe4d" quantity="-100" label="-100" />' +
'<ColorMapEntry color="#0ae042" quantity="100" label="100" />' +
'<ColorMapEntry color="#ff70b" quantity="270" label="270" />' +
'<ColorMapEntry color="#ffaf38" quantity="440" label="440" />' +
'<ColorMapEntry color="#ff641b" quantity="660" label="660" />' +
'<ColorMapEntry color="#FF0000" quantity="2000" label="2000" />' +
'</ColorMap>' +
'</RasterSymbolizer>';

// Agrega la imagen al mapa utilizando la rampa de color como los intervalo definidos.
Map.addLayer(dNBR.sldStyle(sld_intervals), {}, 'dNBR clasificado');

// Separa el resultado en 8 clases de severidad del incendio.
var thresholds = ee.Image([-1000, -251, -101, 99, 269, 439, 659, 2000]);
var classified = dNBR.lt(thresholds).reduce('sum').toInt();

//          AGREGAR ESTADÍSTICAS DE ÁREA QUEMADA
// cuenta el número de píxeles en toda la capa.
var allpix = classified.updateMask(classified); // enmascara toda la capa
var pixstats = allpix.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.count(),          // cuenta píxeles en una sola clase
  geometry: area,
  scale: 30
});

```

```

var allpixels = ee.Number(pixstats.get('sum')); // extrae el recuento de píxeles como un
número

// crea una lista vacía para almacenar los valores en área

var arealist = [];

// crea una función para derivar el alcance de una clase de severidad del incendio

// los argumentos son número de clase y nombre de clase

var areacount = function(cnr, name) {

  var singleMask = classified.updateMask(classified.eq(cnr)); // enmascara una sola clase

  var stats = singleMask.reduceRegion({

    reducer: ee.Reducer.count(), // cuenta los píxeles en una sola clase

    geometry: area,

    scale: 30

  });

  var pix = ee.Number(stats.get('sum'));

  var hect = pix.multiply(900).divide(10000); // Pixel Landsat = 30m x 30m -> 900
m2

  var perc = pix.divide(allpixels).multiply(10000).round().divide(100); // obtiene el % de área

  // por clase y redondea a 2 decimales

  arealist.push({Class: name, Pixels: pix, Hectares: hect, Percentage: perc});

};

// clases de severidad en orden ascendente.

var names2 = ['NA', 'Alta Severidad', 'Moderada/alta Severidad',
'Moderada/baja Severidad', 'Baja Severidad', 'No quemado',
'Nuevo rebrote, Bajo', 'Nuevo rebrote, Alto'];

// ejecuta la función para cada clase

```

```

for (var i = 0; i < 8; i++) {
    areacount(i, names2[i]);
}

print('Área quemada por clase de Severidad', arealist,
'--> haga clic en la lista de objetos para ver las clases individuales');

//                AGREGAR UNA LEYENDA

// Establece la posición del recuadro de leyenda.

var legend = ui.Panel({
    style: {
        position: 'bottom-left',
        padding: '8px 15px'
    }
});

// Crea un título de leyenda.

var legendTitle = ui.Label({
    value: 'Clases del dNBR',
    style: {fontWeight: 'bold',
        fontSize: '18px',
        margin: '0 0 4px 0',
        padding: '0'
    }
});

// Agrega el título al recuadro.

legend.add(legendTitle);

// Crea y estiliza 1 fila de la leyenda.

var makeRow = function(color, name) {
    // Crea la etiqueta que en realidad es el cuadro de color.

```

```

var colorBox = ui.Label({
  style: {
    backgroundColor: '#' + color,
    // Usa (padding) para rellenar y dar la altura y el ancho de la caja.
    padding: '8px',
    margin: '0 0 4px 0'
  });
// Crea la etiqueta llena con el texto descriptivo.
var description = ui.Label({
  value: name,
  style: {margin: '0 0 4px 6px'}
});
// devuelve el panel
return ui.Panel({
  widgets: [colorBox, description],
  layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal')
});

// Paleta de colores
var palette = ['7a8737', 'acbe4d', '0ae042', 'fff70b', 'ffaf38', 'ff641b', 'FF0000', 'ffffff'];

// Nombre de la leyenda
var names = ['Nuevo rebrote, Alto', 'Nuevo rebrote, Bajo', 'No quemado', 'Baja Severidad',
'Moderada-Baja Severidad', 'Moderada-Alta Severidad', 'Alta Severidad', 'NA'];

// Agrega color y nombres
for (var i = 0; i < 8; i++) {
  legend.add(makeRow(palette[i], names[i]));
}

```

```
}  
  
// Agrega la leyenda al mapa (también se puede imprimir la leyenda en la consola)  
Map.add(legend);  
  
//          PREPARAR EL ARCHIVO A EXPORTAR  
  
var id = dNBR.id().getInfo();  
  
Export.image.toDrive({image: dNBR, scale: 30, description: id, fileNamePrefix: 'dNBR',  
region: area, maxPixels: 1e10});
```

*Nota.* Script adaptado de las Prácticas recomendadas de las Naciones Unidas.

<https://un-spider.org/es/asesoria/practic-as-recomendadas/practica-recomendada-mapeo-gravedad-quemaduras/paso-a-paso/google-earth-engine>