UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

ESCUELA DE POSGRADO

==========

“CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DEL TERRITORIO PARA EL AÑO 2014 DE LA PROVINCIA DE PADRE ABAD, DEPARTAMENTO DE UCAYALI”

==========

TESIS PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN

MEDIO AMBIENTE GESTIÓN SOSTENIBLE Y RESPONSABILIDAD SOCIAL

LUZ NADIR VALDIVIA MARQUEZ

PUCALLPA – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
ESCUELA DE POSGRADO

ANEXO Nº 4

ACTA DE DEFENSA DE TESIS DE MAGISTER

En la Sala de Grados de la Universidad Nacional de Ucayali siendo las 11.00 Horas, del día 11 de Mayo de 2018., ante el **Jurado** de Tesis constituido por:

Dr. Roly Baldoceda Astete — Presidente

Ing. Mg. Gabriel Mercado Jauregui — Secretario

Dr. Fredy H. Velásquez Ramirez — Vocal

El aspirante al **GRADO DE MAGISTER o MAESTRO** en Medio Ambiente Gestión Sostenible y Responsabilidad Social

Mención.....

Don (ña) Luz Nadir Valdivia Marquez

Procedió al acto de Defensa:

a. Con la exposición de la tesis titulada:
"Clasificación de la Cobertura y uso del Territorio para el año 2014 de la provincia de Padre Abad, Departamento de Ucayali"

b. Respondiendo las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y público asistente.

Concluido el acto de defensa, cada miembro del Jurado procedió a la evaluación del aspirante a Magíster, teniendo presente los criterios siguientes:

a) Presentación personal

b) Exposición: el problema a resolver, hipótesis, objetivos, resultados, conclusiones, los aportes, contribución a la ciencia y/o solución a un problema social y Recomendaciones.
c) Grado de convicción y sustento bibliográfico utilizados para las respuestas a las interrogantes del Jurado y público asistente.
d) Dicción y dominio de escenario.

Así mismo, el Jurado plantea a la tesis **las observaciones** siguientes:

- Complementar los membretes a los mapas
- Mejorar el resumen indicando la metodología

Obteniendo en consecuencia el Maestrista la **Nota** de 17 (Diecisiete)

Equivalente a APROBADO, por lo que se recomienda Su publicación

(Aprobado o desaprobado)

Los miembros del Jurado, firman el presente **ACTA** en señal de conformidad, en Pucallpa, siendo las 12:45 horas del 11 de Mayo del 20 18.

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

DEDICATORIA

Al Ing. Walter Valdivia, mi padre, amigo y principal soporte.

AGRADECIMIENTO

A mí amada familia por todos sus “tú puedes”: Fran, Chariza y Andy. Gracias tía Nancy!.

A MakCe, por su motivación para concluir con este proyecto. Sr. Barbarán su presencia en mi vida es de lo que más valoro y agradezco.

A la Universidad Nacional de Ucayali, por brindarme valiosas enseñanzas a través de su escuela de Posgrado y por el financiamiento brindado para el desarrollo de esta investigación.

A la ONG AIDER – Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral, por contribuir valiosamente con la presente investigación.

A todos ellos mi más profundo agradecimiento.

RESUMEN

La presente investigación se basó en el uso de la teledetección y los sistemas de información geográfica para la identificación de las coberturas y usos del territorio de la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali. Para lo cual se hizo uso del algoritmo Random Forest sobre segmentos que comprendió el uso insumos cartográficos como: imágenes del satélite Landsat 8OLI, el modelo de elevación digital, imágenes de alta resolución (para el proceso de verificación de los resultados) e información del mapa base de Ucayali (límites, centros poblados y vías terrestres); además del uso de softwares como el ArcGIS, Envi, Envi EX y R. Como resultados se logró mapear y nombrar (de acuerdo al uso de la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Perú por el Ministerio del Ambiente), las principales clases de coberturas y usos del territorio de la provincia de Padre Abad, encontrándose entre las clases más representativas por su extensión a los bosques, con un área estimada de 664 726,56 ha que corresponde al 71,67% del territorio de la provincia y la clase de áreas agrícolas, con aproximadamente 194 577,81 ha que representa el 20,98% de la provincia de Padre Abad, el restante 7% se divide entre las clases de áreas urbanizadas (0,14%), áreas quemadas (0,2%), áreas arenosas naturales (0,13%), ríos (0,83%) y la clase de no data (6,05%). El mapa obtenido como resultado del estudio fue validado logrando un 96% de precisión general.

Palabras claves: teledetección, cobertura vegetal, territorio, CORINE Land Cover, bosque.

ABSTRACT

The present investigation was based on the use of remote sensing and geographic information systems for the identification of coverage and uses of the territory of the province of Padre Abad, department of Ucayali. For which the Random Forest algorithm was made about segments that included the use of cartographic inputs such as: Landsat 8OLI satellite images, the digital elevation model, high resolution images (for the verification process of the results) and information of the base map of Ucayali (boundaries, population centers and land roads); in addition to the use of software such as ArcGIS, Envi, Envi EX and R. As results, it was possible to map and name (according to the use of the legend CORINE Land Cover adapted for Peru by the Ministry of the Environment), the main classes of coverage and uses of the territory of the province of Padre Abad, being among the most representative classes by extension to forests, with an estimated area of 664 726,56 ha corresponding to 71,67% of the territory of the province and the class of areas agricultural, with approximately 194 577,81 ha representing 20,98% of the province of Padre Abad, the remaining 7% is divided among the classes of urbanized areas (0,14%), burned areas (0,2%) , natural sandy areas (0,13%), rivers (0,83%) and the non-dating class (6,05%). The map obtained as a result of the study was validated achieving a 96% general accuracy.

Keywords: remote sensing, vegetation cover, territory, Corine Land Cover, forest.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento cualitativo y cuantitativo de las coberturas vegetales y usos del territorio resulta importante para fines de planificación en cuanto al ordenamiento territorial, permitiendo reconocer la dinámica de procesos de cambios de cobertura y con ello predecir posibles cambios.

Una herramienta importante para este fin es la teledetección que permite seguir procesos dinámicos ya que las imágenes se captan por un sensor que observa la tierra desde una órbita estable y repetitiva (Chuvieco, 1998 citado por Gonzaga, C. 2014). La aplicación de la teledetección es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres que tienen un comportamiento reflectivo variable, condicionado por su estado al momento de la adquisición de la imagen (Pérez y Muñoz, 2006 citado por Gonzaga, 2014). Debido a las características multiespectrales y multitemporales de los datos satelitales, resulta posible la diferenciación de tipos de cobertura vegetal.

Entre las técnicas que existen para la clasificación de la cobertura vegetal se encuentra el uso del algoritmo random forest sobre segmentos, que tiene como principal insumo a imágenes satelitales, modelos de elevación digital y áreas de entrenamiento por cada clase que se espera identificar.

La presente investigación usa el algoritmo random forest sobre segmentos como metodología para clasificar los tipos de cobertura y usos del territorio de la provincia de Padre Abad al 2014.

INDICES

INDICE DEL CONTENIDO

DEDICATORIA iv

AGRADECIMIENTO v

RESUMEN vi

ABSTRACT vii

INTRODUCCIÓN viii

CAPITULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 1

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 1

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 4

1.2.1 Problema general 4

1.2.2 Problemas específicos 5

1.3 OBJETIVOS 5

1.3.1 Objetivo general 5

1.3.2 Objetivos específicos 5

1.4 HIPÓTESIS Y/O SISTEMA DE HIPÓTESIS 6

1.4.1 Hipótesis general 6

1.5 VARIABLES 6

1.6 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 7

1.7 VIABILIDAD 8

1.8 LIMITACIONES 8

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....9

2.1 ANTECEDENTES 9

2.2 TEORÍAS BÁSICAS 23

2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES 53

2.4 BASES EPISTÉMICOS 55

CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....58

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN 58

3.2 DISEÑO Y ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN 58

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA.....59

3.4 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....61

3.5 TÉCNICAS DE RECOJO, PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE DATOS 65

3.5.1 Ubicación del área de estudio 65

3.5.2 Adquisición de materiales cartográficos 68

3.5.3 Pre-procesamiento de imagen satelital Landsat 8OLI 69

CAPITULO IV: RESULTADOS 83

CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....99

CONCLUSIONES.....101

SUGERENCIAS.....103

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 104

ANEXOS.....107

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estructura de la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Perú ..11

Tabla 2. Comparación de resultados de diferentes métodos 22

Tabla 3. Especificaciones de productos LDCM a Nivel 1 40

Tabla 4. Distribución de las bandas en OLI y TIRS 41

Tabla 5. Rangos espectrales y tamaños de píxel de las bandas del sensor OLI 44

Tabla 6. Rangos espectrales y tamaños de píxel de las bandas en el sensor TIRS.....47

Tabla 7. Muestra por cada clase identificada 60

Tabla 8. Características de las imágenes Landsat 8OLI 62

Tabla 9. Superficie de la provincia de Padre Abad.....65

Tabla 10. Áreas de entrenamiento 73

Tabla 11. Información complementaria generada 76

Tabla 12. Diccionario de datos del shapefile resultante 79

Tabla 13. Cantidad de puntos por clase para la verificación del mapa.....82

Tabla 14. Coberturas y usos del territorio en la provincia de Padre Abad al 2014.....83

Tabla 15. Coberturas y usos del territorio en los distritos de la provincia de Padre Abad al 2014 84

Tabla 16. Clasificación de cobertura y uso encontrada en los diferentes tipos de categoría de tenencia de la tierra en la provincia de Padre Abad.....95

Tabla 17. Clasificación de cobertura y uso encontrada de acuerdo a la capacidad de uso mayor de la tierra de la provincia de Padre Abad 96

Tabla 18. Cantidad de puntos usados para la verificación de resultados.....97

Tabla 19. Matriz de error 97

Tabla 20. Proporciones de áreas por clases 98

Tabla 21. Superficie y precisión por clase 98

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Oeste de Londres.....25

Figura 2. Vuelo 112, un lanzador Ariane 5 despega en los cielos de Kourou antiguo puerto espacial de Europa el 28 de octubre de 1998, lleva un ARD y un satélite MAQSat 3.....27

Figura 3. Imagen satelital de “todo” el planeta Tierra.....28

Figura 4. Mosaico de imágenes satelitales 29

Figura 5. Imagen satelital TM, oeste de Londres 29

Figura 6. Fotografía aérea del oeste de Londres 30

Figura 7. Espectro electromagnético.....31

Figura 8. Sensor pasivo 32

Figura 9. Sensor activo 33

Figura 10. Valores del pixel.....34

Figura. 11. Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7 (USGS. 2013). 39

Figura 12. Respuesta espectral relativa en las bandas de las imágenes del Landsat 8OLI 42

Figura 13. Construcción del sensor OLI en el satélite LDCM. Desarrollado por Ball Aerospace & Technologies Corp LDCM (USGS. 2013).....43

Figura 14. Construcción del sensor TIRS, desarrollado por la NASA y el (GSFC) Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md. 2013 45

Figura 15. Diagrama de procesos desarrollados.....59

Figura 16. Distribución de las áreas de entrenamiento (muestra).....60

Figura 17. Path-row 007-066 empleado en el estudio, con fecha de captura 22 de agosto del 2014 62

Figura 18. Coordenadas geográficas que definen el área de estudio.....66

Figura 19. Mapa de ubicación del área de estudio, provincia de Padre Abad .67

Figura 20. Imagen satelital calibrada radiométricamente.....70

Figura 21. Extracción de elementos de la imagen usada (resaltado en amarillo) 71

Figura 22. Segmentación de imagen 72

Figura 23. Clases de cobertura y uso del suelo de la provincia de Padre Abad al 2014 85

Figura 24. Imagen aérea de áreas urbanizadas.....86

Figura 25. Vista aérea de deforestación por instalación de Palma aceitera.....87

Figura 26. Áreas agrícolas 88

Figura 27. Vista del dosel superior del bosque 89

Figura 28. Áreas arenosas naturales 90

Figura 29. Áreas quemadas como parte de la preparación de terrenos para la instalación de cultivos 90

Figura 30. Río Aguaytía 91

Figura 31. Nubes y sombras 92

Figura 32. Mapa de cobertura y uso del territorio de la provincia de Padre Abad 93

CAPITULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La superficie terrestre presenta diferentes tipos de coberturas naturales, las mismas que van variando a lo largo del tiempo, y que tienen como origen principal de este cambio a las actividades antrópicas (agricultura, expansión urbana, minería, etc.) y los fenómenos naturales (inundaciones, sequías, incendios, etc.). Al ser fluctuantes las coberturas y usos de la tierra, se realizan análisis periódicamente a fin de contar con información que permita monitorear el progreso del cambio, detectar las causas principales de tales cambios y la ubicación de los mismos. La carencia de información cualitativa, cuantitativa y espacial de los diferentes tipos de coberturas y usos actuales de la tierra, limita el conocimiento y la adecuada planificación de acciones a desarrollarse en un lugar determinado.

El uso de los Sistemas de información geográfica (SIG) y la teledetección se han ido posicionando cada vez más como herramientas que permiten la generación de información a partir del análisis de diversos insumos, y que, mediante el desarrollo de diversos protocolos permiten obtener datos confiables respecto a una temática.

Para obtener una clasificación de cobertura y uso de la tierra para un lugar determinado, se vienen desarrollando ciertas metodologías, una de ellas comprende el uso de la metodología Random forest sobre segmentos, que se ve complementada por el uso de la leyenda CORINE Land Cover (CLC), que tuvo sus orígenes en la Unión Europea, y su acogida por Repúblicas como Colombia.

En el Perú, el Ministerio del Ambiente (MINAM) en cumplimiento a sus funciones y competencias asignadas en materia de Ordenamiento Territorial, emitió la Resolución Ministerial N° 135-2013-MINAM[1], que aprueba la Guía Metodológica para la elaboración de los Instrumentos Técnicos Sustentatorios para el Ordenamiento Territorial. En esta guía se menciona al Estudio de análisis de los cambios de la cobertura y uso de la tierra, y a la actualidad vienen elaborando las guías de procedimiento metodológico que considera incluir el uso de CORINE Land Cover, esto con la finalidad de contar con las bases que contemplen el uso de la metodología por los diferentes estamentos del Estado Peruano.

Como avances el MINAM ha venido realizando talleres en los que presentan la metodología y la estructura preliminar de la leyenda CORINE Land Cover. CORINE Land Cover (CLC) es una leyenda jerárquica, que vincula distintos niveles de detalle espacial con distintos niveles de detalle temático o niveles de la leyenda jerárquica. (Arnillas, *et al*. 2012). En principio la Leyenda CLC adaptada al Perú es una leyenda jerárquica de 4

[1] http://sinia.minam.gob.pe/index.php?accion=verElemento&idElementoInformacion=1348

niveles con 74 clases de coberturas y usos de la tierra. Nivel I (6u), Nivel II (19u), Nivel III (43u), Nivel IV (6u) la propuesta de una leyenda estándar permite realizar comparaciones entre las unidades establecidas a nivel Nacional (MINAM, 2012).

La metodología usó como insumos, rasters (imágenes satelitales y modelos de elevación digital) de la zona de estudio, áreas de entrenamiento para las diferentes coberturas y usos a identificar e información complementaria que se genera a partir de las dos primeras. Asimismo, se requirió el uso de softwares que permitieron el procesamiento de las imágenes satelitales, la determinación de las clases identificadas y la integración de los resultados.

Un mapa de cobertura y uso actual de las tierras, permite conocer (sin necesidad de recorrer *in situ*) la orientación y distribución espacial de las principales actividades económicas y productivas del medio a estudiar para un momento determinado. Esta Información puede servir como punto de partida, para la toma de decisiones públicas o privadas, tendientes a efectuar o implementar programas de reordenamiento territorial, como consecuencia de la aplicación de recomendaciones técnicas, propuestas por los estudios de Zonificación Ecológica y Económica, orientadas hacia el desarrollo rural sostenible.

Por todo lo indicado, el presente estudio buscó **Identificar, mapear y describir los diferentes tipos de coberturas y usos de la tierra en la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali, al año 2014.**

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La limitada información sobre los diferentes tipos coberturas y los usos de la tierra para la provincia de Padre Abad, no permiten una apropiada planificación de actividades y proyectos, que conlleven a un adecuado manejo, aprovechamiento y conservación de los recursos. Con el afán de aliviar este tipo de limitación (presente también en otros espacios geográficos), se han venido desarrollando metodologías con el uso de softwares y protocolos que permiten la obtención de buenos resultados, a menores costos y en un menor tiempo.

En ese sentido la presente investigación planteó los siguientes problemas, los mismos que fueron absueltos con el desarrollo de la misma:

1.2.1 Problema general

¿Cuáles son los principales tipos de coberturas y usos del territorio al 2014 en la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿La metodología Random Forest sobre segmentos clasifica de manera adecuada los tipos de cobertura y uso del territorio al 2014 en la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali?
- ¿La leyenda CORINE Land Cover adaptada para la provincia de Padre Abad permitirá asignar una adecuada nomenclatura a los tipos de coberturas clasificadas con la metodología Random Forest sobre segmentos al 2014?
- ¿Con los resultados de la clasificación se podrá obtener un mapa de clasificación de la cobertura y uso actual del territorio al 2014 de la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Clasificar la cobertura y el uso del territorio al 2014 de la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali.

1.3.2 Objetivos específicos

- Clasificar mediante el uso de la metodología Random Forest sobre segmentos los tipos de coberturas y uso del territorio de la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali.
- Identificar y describir el uso actual del territorio de la provincia de Padre Abad, según la leyenda CORINE Land Cover.
- Elaborar el mapa de cobertura y uso actual del territorio al 2014 de la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali.

1.4 HIPÓTESIS Y/O SISTEMA DE HIPÓTESIS

1.4.1 Hipótesis general

H_A: La metodología Random Forest sobre segmentos y la leyenda CORINE Land Cover permiten una clasificación aceptable de los tipos de cobertura y uso del territorio de la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali, para el año 2014.

Ho: La metodología Random Forest sobre segmentos y la leyenda CORINE Land Cover no permiten una clasificación aceptable de los tipos de cobertura y uso del territorio de la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali, para el año 2014.

1.5 VARIABLES

1.5.1 Variable independiente: Cobertura y uso actual del territorio de la provincia de Padre Abad.

1.5.2 Variables dependientes: Resultados de clasificación del tipo de cobertura y uso del territorio dado por la metodología Random Forest sobre segmentos.

1.6 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El departamento de Ucayali cuenta con una importante cobertura boscosa, sin embargo a lo largo de los años diversas actividades de origen antrópico han ido mermando este tipo de cobertura. Es importante identificar las nuevas coberturas o usos que vienen sustituyendo a la original cobertura boscosa. Tan importante como saber cuáles son las nuevas coberturas o usos, es también importante conocer la distribución espacial de estos cambios, puesto que, podrían desarrollarse en áreas de protección o cuya capacidad de uso mayor no corresponda al uso que se le está dando.

En tanto mayor sea nuestro conocimiento respecto a lo que nos rodea, mejores serán nuestras acciones, planificaciones y concepción del entorno. Sin embargo no siempre tenemos el total de la información que se requiere y es ahí cuando la limitada información podría conllevar a la inadecuada toma de decisiones.

El adecuado manejo de los recursos naturales se encuentra directamente relacionado con el conocimiento de las características cualitativas y cuantitativas del mismo, además de reconocer su ubicación espacial, es así que, se generan diversos mapas que permiten representar la distribución espacial de determinados recursos y con ello permitir la planificación de las acciones concernientes a su manejo.

La presente investigación permitió identificar los tipos de coberturas y usos del territorio en la provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali, al 2014, dando como resultados datos cualitativos, cuantitativos y de ubicación de las clases identificadas. Esta información podría ser utilizada por el sector agricultura como referencia sobre la ubicación de las áreas agrícolas y sobre las cuales podrían realizar una estratificación a fin de ubicar los principales cultivos producidos en esta provincia.

1.7 VIABILIDAD

El proyecto de investigación resultó viable, puesto que la metodología empleada cuenta con el respaldo de otras experiencias que fueron desarrolladas en el ámbito nacional.

1.8 LIMITACIONES

Puesto que la metodología desarrollada utiliza como insumos las imágenes satelitales, se requiere que las mismas no presenten nubes que limiten la identificación de las coberturas y usos del territorio. Es así que, en un inicio se propuso que el año de estudio sea al 2013, sin embargo, al no encontrarse imágenes adecuadas para esa época, se optó por realizar el cambio de año del estudio al 2014.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Internacional

El 27 de junio de 1985, en virtud de una decisión del Consejo de Ministros de la Unión Europea, se inicia el Programa CORINE, Coordination of Information of the Environment, un proyecto experimental para la recopilación, coordinación y homogenización de la información sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales en la Comunidad. Dentro de este programa se crea el proyecto CORINE Land Cover (CLC) - desde 1995 responsabilidad de la Agencia Europea del Medio Ambiente - -con el objetivo fundamental de obtener una base de datos europea de ocupación del suelo a escala 1:100.000, útil para el análisis territorial y la gestión de políticas europeas (IGN-España, 2014).

En la actualidad este proyecto está incluido en el Land Core Monitoring System de GMES (Global Monitoring for Environment and Security), una iniciativa de la Unión Europea (UE) para desarrollar su propia capacidad operativa de observación de la Tierra en Europa (IGN-España, 2014).

La metodología Corine Land Cover se adoptó en Colombia en el marco del programa de apoyo y la colaboración prestada por el Fondo Francés para el Medio Ambiente (FFEM), la Embajada de Francia en Colombia, el Instituto Geográfico Nacional de Francia (ING) y ONF Andina Colombia, con el fin de promover una metodología unificada y

estandarizada para el contexto colombiano en relación a coberturas de la tierra (SIAC-Colombia, 2014).

Corine Land Cover en Europa viene desarrollándose desde 1990, definiendo una metodología específica para realizar el inventario de coberturas de la tierra, constituyéndose en soporte para la toma de decisiones en políticas relacionadas con el medio ambiente y el ordenamiento territorial; aplicándose hoy en día en la totalidad del territorio europeo (SIAC-Colombia, 2014).

La base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a escala 1:100.000. Como principal resultado el país cuenta con la "Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia" (SIAC-Colombia, 2014).

2.1.2 Nacional

2.1.2.1 Leyenda CORINE Land Cover

Esta leyenda cuenta con una estructura base constituida por 4 niveles con 74 clases de coberturas y usos de la tierra. Estos niveles se subdividen en: Nivel I (con 6 unidades), Nivel II (con 19 unidades), Nivel III (con 43 unidades), Nivel IV (con 6 unidades). Esta leyenda permite una clasificación y sub clasificación a las diferentes coberturas identificadas. El

uso de la leyenda y las clases descritas en ella dependerá del grado de detalle que requiera el estudio, la escala de trabajo y la zona específica a clasificar (MINAM, 2012).

Tabla 1. Estructura de la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Perú

Nivel I	Nivel II	Nivel III	Nivel IV
1. Áreas Artificializadas	1.1. Áreas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo	
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo	
	1.2. Áreas industriales e infraestructura	1.2.1. Áreas industriales o comerciales	
		1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	
		1.2.3. Áreas portuarias	
		1.2.4. Aeropuertos	
		1.2.5. Obras hidráulicas	
	1.3. Áreas de extracción de minería e hidrocarburos y escombreras	1.3.1. Areas de extracción de minería e hidrocarburos	
		1.3.2. Areas de disposición de residuos	
	1.4. Áreas verdes artificializadas, no agrícolas	1.4.1 Áreas verdes urbanas	
		1.4.2 Instalaciones recreativas	
2. Áreas Agrícolas	2.1 Cultivos transitorios		
	2.2 Cultivos permanentes		
	2.3 Pastos		
	2.4 Áreas agrícolas heterogéneas		
	2.5 Mosaico de áreas agrícolas y áreas mayormente naturales		
3. Bosques y áreas mayormente naturales	3.1. Bosques	3.1.1. Bosque denso bajo	
		3.1.2. Bosque abierto bajo	
		3.1.3. Bosque denso alto	
		3.1.4. Bosque abierto alto	
		3.1.5. Bosque fragmentado	
	3.2 Bosques plantados		
	3.3 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustivo	3.3.1 Herbazal	3.3.1.1 Herbazal denso
			3.3.1.2 Herbazal abierto
		3.3.2 Arbustal	3.3.2.1 Arbustal denso
			3.3.2.2 Arbustal abierto
		3.3.3 Vegetación secundaria o en transición	3.3.3.1 Vegetación arbustiva / herbácea densa
			3.3.3.2 Vegetación arbustiva / herbácea abierta
		3.3.4 Vegetación arbustiva / herbácea	
		3.3.5 Arbustal / área intervenida	
		3.3.6 Herbazal / área intervenida	
		3.3.7 Arbustal-Herbazal/área intervenida	

	3.4 Áreas sin o con poca vegetación	3.4.1. Áreas arenosas naturales
		3.4.2 Afloramientos rocosos
		3.4.3 Tierras desnudas (incluye áreas erosionadas naturales y también degradadas)
		3.4.4 Áreas quemadas
		3.4.5 Glaciares
		3.4.6 Salares
4. Áreas húmedas	4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.1. Áreas Pantanosas
		4.1.2. Turberas y bofedales
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
	4.2 Áreas húmedas costeras	4.2.1. Pantanos costeros
		4.2.2. Salitral
		4.2.3. Sustratos y sedimentos expuestos en bajamar
5. Superficies de Agua	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Ríos (50 m)
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales permanentes
		5.1.3. Lagunas, lagos y ciénagas naturales estacionales
		5.1.4. Canales
		5.1.5. Cuerpos de agua artificiales
	5.2 Aguas costeras	5.2.1. Lagunas costeras
		5.2.2. Mares y océanos
		5.2.3. Estanques para acuicultura marina
6. Nubes	6.1 Nubes	
	6.2 Sombras	

Fuente: MINAM, 2012

2.1.2.2 Métodos para la clasificación de la cobertura y uso del territorio

Se encontraron algunos enunciados dados por el MINAM en su informe final del proyecto “Análisis de las dinámicas de cambio de cobertura de la tierra en la Comunidad Andina”, en los que se hace mención a las metodologías que podrían adecuarse para la determinación de los diferentes tipos de coberturas, los mismos que se detallan a continuación:

Entre los métodos probados para la determinación de los diferentes tipos de cobertura están los métodos **no supervisados, supervisados e interpretación visual**. Los métodos no supervisados buscan recuperar la información contenida en la imagen. Estos métodos buscan criterios de separabilidad de la información que hay en ella misma para identificar patrones que luego son analizados por el intérprete. Los sistemas de clasificación supervisada buscan incorporar la experiencia del intérprete en la definición de las clases a ser representadas en el mapa. En cualquiera de estos casos, las unidades a clasificarse pueden ser tanto píxeles como segmentos y los algoritmos pueden incorporar sólo los datos de la imagen o también información complementaria. Finalmente, en el caso de la clasificación visual, el intérprete emplea su conocimiento para desarrollar el proceso de mapeo (Arnillas, *et al*. 2012).

Un primer aspecto considerado fue la preferencia por sistemas de clasificación supervisados por permitir, en opinión del comité técnico (MINAM, UNALM y la Fundación para el desarrollo Agrario, además de otros colaboradores), facilitar la capacidad de aprender del sistema, entendiendo el “sistema” como el conjunto de personas, conocimiento y equipos digitales que deberán llevar a cabo la interpretación de las escenas (Arnillas, *et al*. 2012).

En la búsqueda por clasificadores que soporten este tipo de clasificación, el comité técnico optó por trabajar con algoritmos basados en árboles de decisiones por tener menor cantidad de supuestos estadísticos,

en comparación con los sistemas basados en otros criterios como los de máxima verosimilitud.

a. Árboles de decisión y algoritmos de clasificación

Los árboles de decisión, también llamados árboles de clasificación, son una serie de métodos muy flexibles de regresión y de clasificación, que pueden manejar un gran número de variables, incluso con problemas de correlación entre ellas (Salinas, J. Y Salazar, C. 2006 citado por Arnillas, *et al*. 2012). Los árboles de clasificación funcionan generando particiones secuenciales del conjunto de datos inicial de tal forma que se maximicen las diferencias de la variable que se quiere clasificar. Al realizarse las divisiones de forma secuencial, se construye un esquema tipo "arborescente", donde cada rama es una regla de decisión "si-entonces" (Perichinsky, 2007 citado por Arnillas, *et al.* 2012). Estas reglas son más intuitivas que las generadas por otros clasificadores, como las redes neuronales, sin embargo, la gran cantidad de ramificaciones hacen que su interpretación no sea fácil.

Diversas instituciones han desarrollado programas específicos de árboles de clasificación. Una familia de ellos es la familia CLS (CLS, ID3, C4.5, C5.0, entre otros) desarrollada por Rule Quest Research Pty Ltd y que su propósito inicial es detectar relaciones estadísticas complejas. El número de ramas que puede originar varía entre dos y el número de categorías del predictor. Para determinar el tamaño del árbol utiliza pruebas de significación estadística (con ajustes de multiplicidad en las últimas versiones).

b. See5/C5

See5/C5 es el nombre comercial que desde 1997 reemplaza al algoritmo C4.5 que a su vez, provienen de CLS e ID3 (Perichinsky 2007, citado por Arnillas, *et al*. 2012). See5/C5 es considerado como una herramienta de la "minería de datos", y como tal, ha sido diseñado para analizar bases de datos que contengan cientos de miles de registros con centenares campos de todo tipo de información (Rulequest Research, 2012 citado por Arnillas, *et al*. 2012). Para maximizar la interpretación de los datos, los clasificadores de SEE5/C5 son expresados como "árboles de decisión". El objetivo de la herramienta es descubrir patrones y delinear categorías y usándolos para hacer predicciones (Perichinsky, 2007 citado por Arnillas, *et al*. 2012).

See5/C5 se aplica en diversos campos: seguros, contabilidad, recomendar lentes de contacto, compra de computadoras, determinación de créditos, tipo de fármaco a administrar, desarrollo de políticas de personal en una empresa, determinar el tipo de labor que puede desempeñar una persona, entre otros.

La clasificación del uso de la tierra dentro del National Land Cover Database 2001 de Estados Unidos, se usó el software See5. Para ello ERDAS IMAGINE creó una interface para extrapolar los modelos de árboles de decisión derivados en pixeles clasificados. Luego de comparar algunos algoritmos de clasificación, el Proyecto SERENA (Seguimiento y estudio de los recursos naturales) determinó que la mayor exactitud general (89,9%) se obtuvo con un árbol de clasificación, seguida por las

redes neuronales (88,3%), y por el “support vector machine” (78,4%) y que el software utilizado para tal fin fue See5/C5 en entorno Linux. Este proyecto usó esta metodología para la cartografía periódica de la cobertura del suelo en Latinoamérica y el Caribe usando imágenes MODIS. Por otro lado, el LTA utiliza también esta metodología para el estudio de la deforestación usando imágenes LANDSAT; también la ha usado para clasificar bosques del Alto Mayo a partir de imágenes Rapid Eye (Arnillas, *et al*. 2012).

c. Random Forest

Random Forest es un algoritmo de clasificación no lineal que permite identificar patrones en los datos que se incorporan como entrada de información. Dicho algoritmo construye cientos de árboles de regresión y emplea un sistema de “votos” entre el conjunto de árboles para “decidir” la clase -cada árbol calibrado es un voto, y se asigna la clase en función de cuántos votos obtiene cada una de las unidades a ser clasificadas (Breiman, L. 2001 citado por Arnillas, *et al*. 2012).

2.1.2.3 Metodologías de clasificación usadas por el equipo técnico del proyecto "Análisis de las dinámicas de cambio de cobertura de la tierra en la Comunidad Andina"

a. See5/C5 con y sin corrección radiométrica

Con esta metodología las clases del nivel 1 y las clases del nivel 2 de la leyenda son bien detectadas y delimitadas con esta metodología a excepción de las correspondientes a las áreas artificializadas (nivel 1 y nivel 2). En el nivel 3, los afloramientos rocosos, las zonas arenosas naturales, los glaciares, las zonas quemadas y los bofedales bien definidos, fueron muy bien definidos con el uso del clasificador elaborado a partir de SEE5/C5. Por lo que si se quiere mapificar las otras áreas del nivel 3 y las áreas artificializadas de la leyenda, se requiere realizar una interpretación visual, que dependiendo de la imagen, podría tomar tiempo (Arnillas, *et al*. 2012).

b. Análisis visual y método híbrido modificado

b.1 Interpretación visual

Se interpreta visualmente, para lo cual se usa el programa Arc GIS 9.3. La escala de trabajo es de 1:40 000 a 1:50 000 y cuando se necesita digitalizar áreas menores a 25 ha o complicadas, se trabaja hasta con una escala de 1:15 000. La combinación de bandas usada es 453, pero se podría emplear algún otro tipo de combinación de bandas o realce (proporcionado por el mismo programa) según los requerimientos del intérprete (Arnillas, *et al*. 2012).

b.2 Método híbrido modificado

Se siguió el protocolo del método híbrido del protocolo ecuatoriano (MAE) con algunas variaciones. A continuación se hace una reseña del protocolo tal como debe implementarse.

El primer paso es la realización de la segmentación con el programa ENVI y posteriormente se rasteriza la segmentación. Se clasifica la imagen de manera no supervisada con el programa ERDAS y se genera un archivo con 255 clases. Luego se realiza un proceso iterativo de selección de clases con alta separabilidad espectral. El proceso fue implementado usando también ERDAS y una hoja de cálculo Excel. La hoja de cálculo lee el reporte de separabilidad generado en ERDAS y determina las clases que están correlacionadas para su posterior eliminación en la ventana de edición de firmas espectrales (Signature Editor) (Arnillas, *et al*. 2012).

Posteriormente se realiza una clasificación supervisada con ERDAS, obteniéndose una imagen con atributos para las 255 clases. Esta imagen obtenida recibió un post proceso en ArcGis a fin de mantener solo las clases con información generadas. A cada una de las clases se les asigna una categoría de la leyenda. El proceso de asignación de atributos temáticos se realiza visualmente utilizando como referencia la imagen satelital, en este caso se usó la combinación de bandas 543. Esta imagen de referencia permitió reasignar atributos temáticos a las clases discriminadas por la clasificación automática. El proceso se realiza clase por clase (una a la vez) y se continua hasta que todos los registros del

tuvieran asignada una clase de la leyenda. Una vez asignadas las clases a los segmentos, y a diferencia del protocolo ecuatoriano, se realizó una unión de los polígonos mediante la herramienta dissolve de ArcGis, con el fin de reducir la cantidad de polígonos y que estos sean de mayor tamaño (Arnillas, *et al*. 2012).

Posteriormente se procedió a realizar una revisión visual y una edición manual, de modo que se corrigieron las clases mal asignadas y se redefinieron los límites de polígonos. Luego se interpretó visualmente para determinar los niveles de la leyenda que no se pudieron obtener mediante el proceso realizado (Arnillas, *et al*. 2012).

Se observaron algunos problemas con este procesamiento. El problema principal con la interpretación visual fue el avance algo lento debido a la complejidad de la leyenda y a la escala de trabajo (de 1:40 000 a 1:15 000). Por otro lado, la segmentación automática con ENVI dio como resultado un archivo bastante “pesado” (con muchos segmentos), lo que lo hizo difícil de trabajar. Debido a que el archivo resultante debe ser editado, su gran tamaño hace que el procesamiento sea bastante lento. Además, la segmentación automática produjo límites que no siempre dividieron bien las clases. También hubo errores en la asignación de clases así como clases iguales fueron separadas. Todos estos problemas tuvieron que ser editados manualmente (Arnillas, *et al.* 2012).

c. See5/C5 con segmentos como áreas de entrenamiento

Esta prueba busca evaluar la segmentación como herramienta para simplificar el trabajo de los intérpretes al momento de definir las áreas d entrenamiento. Es decir, se mantuvieron los píxeles como unidad de análisis y se reemplazó el trabajo del intérprete de dibujar las áreas de entrenamiento por un trabajo de selección de segmentos (Arnillas, *et al.* 2012).

Con esta metodología no se obtuvieron buenos resultados en las primeras iteraciones de la clasificación supervisada (con SEE5/C5) a nivel de toda la escena, puesto que la selección de áreas de entrenamiento no fueron las idóneas para la escena, siendo una gran limitante restringirse sólo a un área dentro de la escena para la representación de áreas de entrenamientos. El resultado de las últimas iteraciones mejoró, sin embargo no cubre en su totalidad las características que muestra la imagen (Arnillas, *et al*. 2012).

d. Random Forest sobre segmentos

La metodología se basa en una clasificación supervisada sobre segmentos, incorporando información complementaria disponible para la imagen. Como clasificador se viene probando el RandomForest. Para el presente estudio se viene usando la implementación sobre RandomForest del programa R (v.2.14.0). En ese sentido, el procesamiento de la información requiere la construcción de tres conjuntos de datos: en primer lugar, las áreas de referencia, que incluyen a las áreas de entrenamiento;

en segundo lugar, los segmentos; y en tercer lugar, una base de datos con información complementaria. Todo este procesamiento parte de la revisión de las imágenes ortorrectificadas (Arnillas, *et al.* 2012).

e. Método híbrido-Isodata

Este método de clasificación se basa en el protocolo de interpretación de imágenes de Ecuador (MAE, Socio Bosque, y CONDESAN 2010), y su aplicación se dio en el marco del proceso de capacitación realizado por el equipo de Ecuador. El método híbrido parte de segmentos construidos empleando la función Feature Extraction del ENVI. En base a esos segmentos, se promedia la información de cada banda. Con esta información se generan 255 clases empleando un algoritmo no supervisado (Arnillas, *et al.* 2012).

Posteriormente dichas clases se van agrupando siguiendo un criterio de máxima separabilidad entre las clases que quedan. Finalmente, se asignan las clases resultantes a las clases que se pueden reconocer en la imagen de forma visual (combinación de bandas 453) (Arnillas, *et al*. 2012).

El ejercicio fue desarrollado para evaluar su viabilidad como parte del protocolo para el Perú, sin embargo no se concluyó su aplicación. El principal motivo que guio la suspensión de su aplicación fue que se trataba de un procedimiento muy trabajoso para su edición. Sin embargo, no fue la única consideración. También parecía recomendable incorporar en el procesamiento otros datos que se obtenían de la segmentación, como los

parámetros de textura o información de máximas y mínimas de los valores de las bandas (Arnillas, *et al.* 2012).

2.1.2.4 Resultados de los métodos usados por el equipo técnico del proyecto "Análisis de las dinámicas de cambio de cobertura de la tierra en la Comunidad Andina"

Los resultados de la aplicación de los métodos fueron comparados y se presentan en el cuadro 2. Como conclusión obtuvieron que el método Random forest sobre segmentos presentó mejores resultados en los indicadores de calidad.

Tabla 2. Comparación de resultados de diferentes métodos

	Método	Avance	PCC[2]	Kappa[3]	Comentarios
a	See5/C5 con y sin corrección radiométrica	Completo	85,80%	0,782	La evaluación de estos procesos dio por resultado gran similitud entre ambos resultados, por lo que los análisis se fusionaron.
b	Análisis visual y método híbrido modificado	Incompleto			El proceso de edición y limpieza se evaluó como muy lento y trabajoso
c	See5/C5 con segmentos como áreas de entrenamiento	Incompleto			Resultados parciales insatisfactorios.
d	Random Forest sobre segmentos	Completo	86,70%	0,8	--
e	Método híbrido-Isodata	Incompleto			El proceso de edición y limpieza se evaluó como muy lento y trabajoso

Fuente: Arnillas, C.A; et al. 2012

[2] Porcentaje correctamente clasificado-PCC

[3] Índice de Kappa, Este índice relaciona el acuerdo que exhiben los observadores, más allá del debido al azar, con el acuerdo potencial también más allá del azar. (http://dxsp.sergas.es/ApliEdatos/Epidat/Ayuda/5-Ayuda%20Concordancia%20y%20Consistencia.pdf)

2.1.3 Regional

En el marco del proceso de Zonificación Ecológica y Económica para el departamento de Ucayali, se han desarrollado estudios biológicos, físicos y socioeconómicos. En el aspecto físico, se desarrolló el estudio denominado “Uso actual del territorio” para la región Ucayali (año 2010), que usó como metodología Random forest sobre segmentos y para la denominación de las clases la leyenda CORINE Land Cover (Propuesta por el MINAM) (GOREU, 2013-datos sin publicar por estar en proceso de revisión).

2.2 TEORÍAS BÁSICAS

2.2.1 Sistemas de información geográfica-SIG y teledetección

De acuerdo a la definición propuesta por el National Center for Geographic Information and Analysis de los Estados Unidos de América: “Un SIG es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación” (Comas y Ruiz, 1993, citado por Lucioni, 2007).

El término "teledetección" es la adaptación al español de la expresión anglosajona *remote sensing* comenzada a utilizar durante la década de los sesenta para nombrar la nueva técnica de adquisición de información nacida con la puesta en órbita de los primeros satélites de observación de la Tierra. Todavía hoy coexisten traducciones más literales del mismo concepto: *sensores remotos*, *percepción remota*, etc. Sin embargo, el

término *teledetección* es sin duda el que más fortuna ha hecho, consecuencia lógica de su propia etimología. Se trata de *observar* un objeto -es decir, *medir* determinadas características del mismo- sin mediar contacto físico con él (Pinilla, 1995).

La teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) guardan una estrecha relación desde sus comienzos y han seguido trayectorias paralelas. Ambas técnicas surgieron como disciplinas independientes y sólo se unían bajo los estudios medioambientales (Lucioni, N. 2007).

En la década de los 80, se comenzó a considerar a la teledetección como una variable auxiliar en los SIG, sirviendo como una fuente más de información para el estudio integrado sobre el territorio (Chuvieco, 2002, citado por Lucioni, N. 2007).

2.2.2 Elementos de la teledetección

De acuerdo a lo citado por la Agencia Espacial Europea – ESA, en teledetección hay cuatro elementos esenciales. Éstos son:

- Una **plataforma** para sostener el instrumento
- Un **objeto** que se va a observar
- Un instrumento o **sensor** para observar el objetivo
- **Información** obtenida a partir de las imágenes

a. Las plataformas

A pesar de la sofisticación de los instrumentos que se emplean para teledetección, si no contáramos con un medio para alejarnos de la superficie de la Tierra, no podríamos aprovecharlos plenamente. Por este motivo, la teledetección es una ciencia relativamente nueva. Antes de que se inventaran los globos aerostáticos y los aviones, no se podían tomar imágenes verticales sistemáticas de la superficie terrestre (ESA, 2014).

Asimismo, la ESA indica como plataformas a las siguientes:

a.1 Los aviones: Los aviones son la manera más obvia de tomar fotos de la Tierra a distancia. Para poder tomar las fotos, los aviones deben llevar cámaras instaladas. Desde la perspectiva de la teledetección, los aviones se caracterizan porque vuelan a altitudes relativamente bajas (a unos pocos kilómetros sobre la superficie) y porque sólo pueden tomar fotografías individuales de extensiones reducidas, aunque captan muchos detalles como coches, personas, árboles, etc. Ver figura 1



Figura 1. Oeste de Londres[4]

[4] Creditos: Window on the UK 2000

a.2 Los satélites: Un satélite es un cuerpo celeste que orbita alrededor de un planeta o un cuerpo celeste que se mueve alrededor de un planeta. Un satélite que todos conocemos es la Luna. Por lo general, se dice que la Luna es un “satélite natural” porque no ha sido creada por el hombre. Por otra parte, los “satélites artificiales” son objetos creados por el hombre que orbitan alrededor de los planetas.

En 1957 un importantísimo acontecimiento señaló el nacimiento de una nueva era en observación terrestre. El primer satélite artificial de la historia (el Sputnik) fue lanzado por la Unión Soviética.

Para que los aviones de vigilancia puedan volar, debe hacer buen tiempo para que haya buenas oportunidades de tomar muchas fotos. Las fotos que se toman con las cámaras de estos aviones suelen ser bastante claras (sin demasiadas nubes). Por otra parte, los aviones no pueden volar todo el tiempo (por la noche o con niebla o lluvia, que puede ocurrir cuando se necesitan las imágenes).

Un satélite no puede “volar” y no puede abandonar la superficie de la Tierra por sí solo. Necesita ser lanzado por medio de un cohete. Un ejemplo de cohete sería el Ariane. Se trata del lanzador de satélites europeo ver figura 2.



Figura 2. Vuelo 112, un lanzador Ariane 5 despega en los cielos de Kourou antiguo puerto espacial de Europa el 28 de octubre de 1998, lleva un ARD y un satélite MAQSat 3[5]

b. Objetos observados

Cuando se realiza una teledetección, el objeto que se observa es la Tierra. La vista que se puede tener del objeto observado puede variar de acuerdo a la necesidad de precisión o detalle del mismo. Así por ejemplo, si se deseara obtener una imagen de la Tierra como un disco entero, el satélite debe estar muy lejos del planeta. Pero un satélite en órbita no puede cambiar su rumbo. Por eso, cuando hace falta tener una imagen de todo el planeta (como un disco entero), se emplea un satélite distinto que orbita más lejos de la Tierra. Como la Tierra es esferoide, es imposible verla toda de una vez, sólo se puede ver un lado cada vez. En una imagen, por tanto, la Tierra parece un disco (ESA, 2014).

Alternativamente, cuando los científicos desean tener una imagen de una parte mayor de la superficie de la Tierra, programan el sensor a bordo

[5] Créditos: ESA/CNES/Arianespace

del satélite para que tomen varias imágenes una al lado de la otra. Realizando un mosaico con las imágenes, podemos obtener una vista de un área mayor del suelo o incluso de todo el planeta. Por consiguiente, según el tipo de imagen que se necesite y la órbita del satélite, existen dos tipos principales de imágenes (ESA, 2014).

En la figura 3, el satélite se encuentra en una órbita relativamente apartada de la Tierra (± 36.000 km). Por eso se puede ver “todo” el planeta. Por otro lado en la figura 4, la órbita del satélite está mucho más cerca de la Tierra (±800 km). Cada cuadrado (negro y rojo) representa una imagen. Cuando se juntan varias imágenes para formar una imagen mayor, se está creando lo que los científicos denominan “mosaico”.

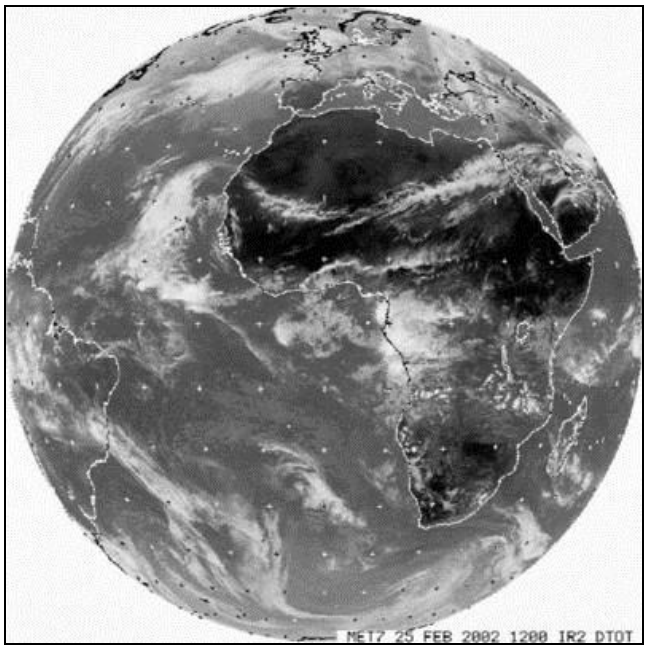


Figura 3. Imagen satelital de “todo” el planeta Tierra[6]

[6] Créditos ESA

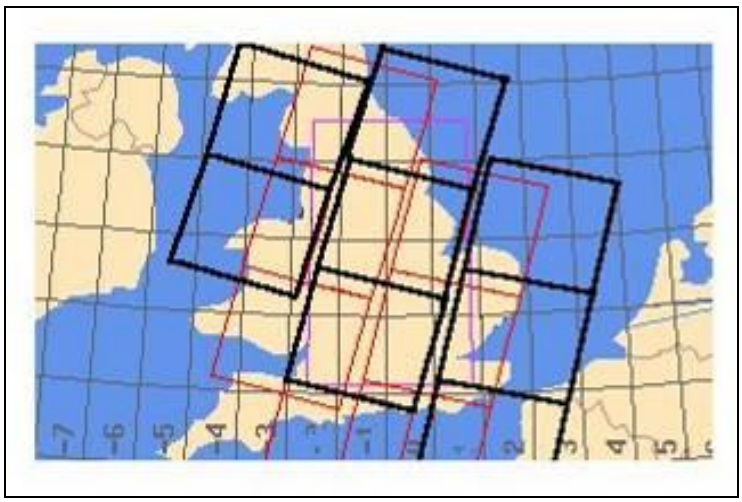


Figura 4. Mosaico de imágenes satelitales[7]

Según el tipo de tarea que se deba realizar, se elegirá el tipo de imagen que sea más apropiada. Por ejemplo, para medir el crecimiento de una ciudad, la imagen que se aprecia en la figura 5 (imagen de satélite) será la más apropiada, mientras que para medir la densidad del tráfico en el río Támesis, conviene más el uso de la imagen que se aprecia en la figura 6 (fotografía aérea).



Figura 5. Imagen satelital TM, oeste de Londres[8]

[7] Créditos ESA
[8] Créditos ESA



Figura 6. Fotografía aérea del oeste de Londres[9]

c. Los sensores

En teledetección, el dispositivo utilizado para adquirir imágenes se suele denominar “sensor”. Preferimos emplear la palabra sensor porque hace referencia a más maneras de obtener información que una cámara. La cámara suele asociarse con la información que sólo puede percibirse por el ojo, mientras que en teledetección participan muchos tipos distintos de radiación del espectro electromagnético (ESA, 2014).

- ***Espectro electromagnético***

En teledetección, los sensores también pueden tomar información que el ojo humano no puede ver normalmente (usando radiaciones de otras partes del espectro electromagnético distintas de la luz visible). Todos los objetos reflejan algo de la luz que llega a ellos. Esta porción de luz

[9] Window on the UK 2000

generalmente 'da' el color a los objetos. Algunos objetos no sólo reflejan la luz que llega a ellos sino que también emiten "radiación" (ESA, 2014).

La luz (y el calor) que emiten y reflejan los objetos se llama "radiación". La radiación es un grupo de partículas cargadas eléctricamente en movimiento. El movimiento, en este caso, es una "onda". Por tanto, para medir la radiación emitida o reflejada por los objetos, es necesario medir su longitud de onda, es decir, la longitud de la onda de radiación que emana del objeto (ESA, 2014).

Midiendo la longitud de onda de muchos objetos diferentes se ha descubierto que algunos objetos reflejan longitudes de onda que no pueden verse por el ojo humano (como, por ejemplo, la infrarroja). La agrupación de todas las longitudes de onda posibles se llama "espectro electromagnético". Para poner un ejemplo de lo que contiene el espectro, los científicos han resumido el espectro electromagnético tal y como se aprecia en la figura 7 (ESA, 2014).

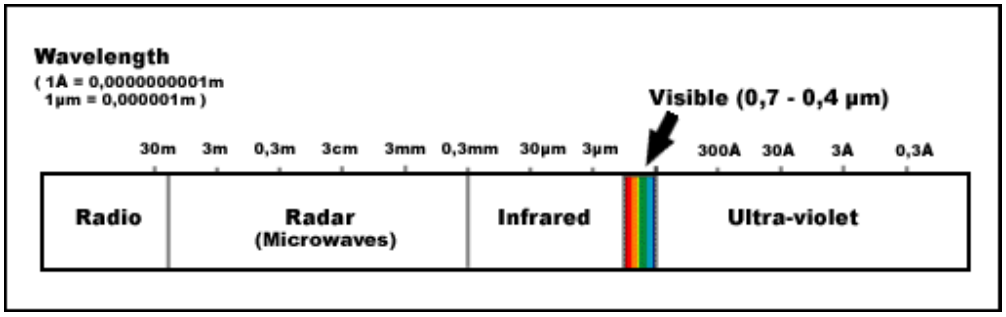


Figura 7. Espectro electromagnético

Asimismo la ESA, clasifica a los sensores como pasivos y activos:

c.1 Sensores pasivos: Todos los sensores especializados en la recepción de longitudes de onda reflejadas o emitidas por los objetos se denominan “sensores pasivos”. Ver figura 8.

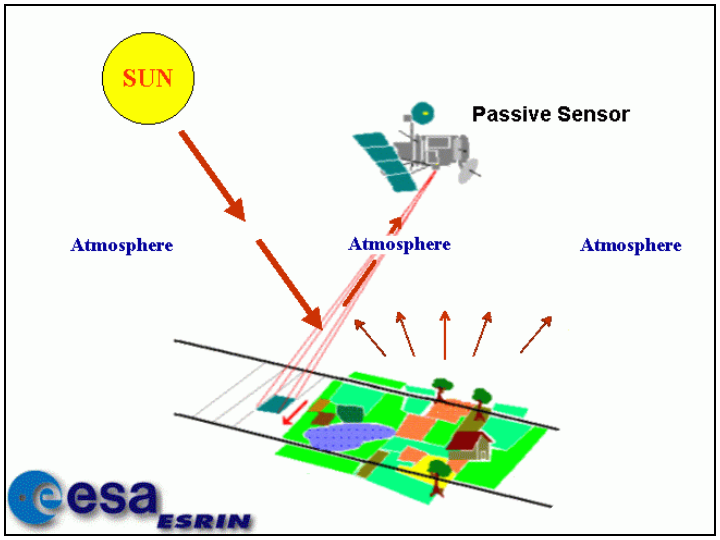


Figura 8. Sensor pasivo

c.2 Sensores activos: El principal inconveniente de los sensores pasivos es que no sirven si el cielo está cubierto de nubes o hay oscuridad. Por lo tanto, se debe emplear otro tipo de sensor. Estos sensores se llaman “sensores activos” porque emiten rayos que reflejan en los objetos y miden la energía que se devuelve reflejada al sensor. El sensor activo que se emplea más en teledetección es el “radar”. Ver figura 9.

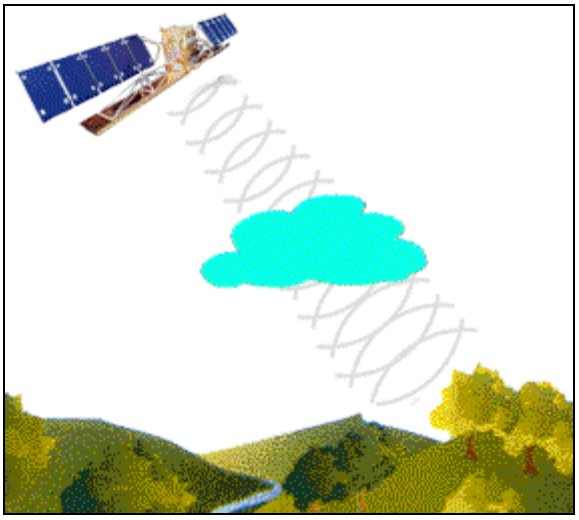


Figura 9. Sensor activo

d. Información contenida en una imagen

En teledetección, es muy importante comprender los distintos datos proporcionados por los sensores para poderlos interpretar correctamente. Lo primero que hay que hacer es comprender qué es una imagen de satélite y en qué se diferencia de una fotografía. La principal diferencia entre una fotografía y una imagen de satélite es que la foto tiene un *formato analógico* y se suele imprimir en papel antes de poderse interpretar. La imagen de satélite tiene *formato digital* y se suele emplear un ordenador para analizarla e interpretarla (ESA, 2014).

El formato analógico es un formato que guarda todos los datos continuamente. En cambio, el formato digital guarda cada bloque de información diferenciadamente. El formato digital se basa realmente en un procedimiento matemático denominado “sistema binario” mediante el cual los ordenadores pueden registrar datos y transformarlos para poderlos calcular y guardar, incluso para crear imágenes (ESA, 2014).

d.1 Pixel: El píxel, la unidad más pequeña de una imagen de satélite, es muy importante: los píxeles, juntos, proporcionan toda la información que compone una imagen entera.

d.1.1 Resolución: La resolución de una imagen es la distancia más pequeña que el sensor puede identificar.

d.1.2 Valores del pixel: Cada píxel de una imagen tiene un valor. El valor corresponde a la intensidad de la radiación reflejada por el objeto observado dentro de unos límites de longitud de onda a los que el sensor es sensible. El valor de píxel va de 0 (= negro) a 255 (= blanco), por lo que hay 256 posibilidades, que se corresponde con 1 byte.

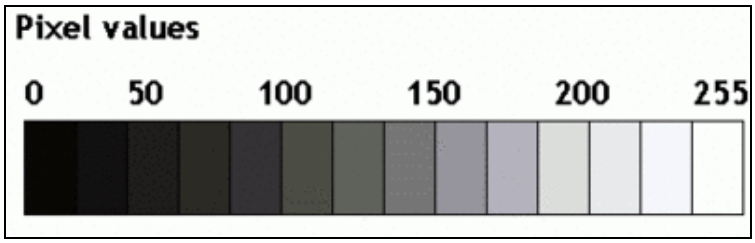


Figura 10. Valores del pixel

2.2.3 Programa Landsat

Antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un concepto visionario. Hecho que da origen al Programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos

(USGS). El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Esta serie de datos, que se inició en 1972, es la más larga de la historia y continua registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada; de manera general cada pixel en su imagen tiene un tamaño con el que se podría cubrir un campo de béisbol (Ariza, 2013).

En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM) es el octavo satélite de observación de la serie Landsat y continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia. Este programa amplía, mejora y avanza en el registro de imágenes mutiespectrales, mantenimiento la misma calidad de sus siete predecesores (Ariza, 2013).

El mismo Ariza indica que, tras el lanzamiento, el satélite LDCM fue rebautizado como Landsat 8. Este sistema está compuesto de dos grandes segmentos:

- El observatorio; el cual consta de una plataforma con capacidad de carga de dos de sensores de observación terrestre, el primero de ellos denominado *Operational Land Imager* (OLI) y el sensor térmico infrarrojo *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). OLI y TIRS recogen los datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de la

superficie terrestre, incluyendo las regiones costeras, hielo polar, las islas y las zonas continentales. El OLI es un instrumento construido por la empresa Ball Aerospace & Technologies Corporation en Boulder, Colorado y el TIRS es un instrumento que fue construido por la NASA en el centro de vuelo espacial Goddard en Greenbelt, Md. Además, el LDCM seguirá la misma secuencia de trayectoria (también conocida como “paths” o rutas de acceso) como sus antecesores Landsat 4, Landsat 5 y Landsat 7. Esto permitirá que todos los datos del LDCM sean referenciados al mismo sistema de coordenadas, continuando con el registro de datos desde hace décadas.

El satélite almacena los datos del sensor OLI y TIRS en una grabadora de estado sólido incluida a bordo y transmite los datos a estaciones receptoras terrestres.

- El segundo segmento es el sistema terrestre, el cual proporciona la capacidad necesaria para la planificación y programación de las operaciones del LDCM y todas aquellas necesarias para administrar y distribuir los datos.

La plataforma LDCM, fue construida por la empresa Orbital Sciences Corporation en Gilbert, Arizona, tiene una vida útil de 5 años, pero lleva suficiente combustible para 10 años de operaciones. La nave orbitará de norte a al sur durante el día, cruzando el ecuador a las 10 a.m., hora local,

con una órbita aproximada de unas 438 millas (705 kilómetros) por encima de la Tierra (USGS. 2013, citado por Ariza, 2013).

2.2.4 Satélite Landsat 8

La Administración Nacional Aeronáutica y espacial (The National Aeronautics and Space Administration – NASA[10]) indica que, el Landsat 8 inició oficialmente sus operaciones el 30 de mayo de 2013, cuando la dirección de operaciones de satélites fue transferida de la NASA al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Con el hand-off, el nombre del satélite cambió de la Misión de Continuidad de Datos de Landsat a Landsat 8. El USGS ahora dirige el equipo de operaciones de vuelo por satélite en el Centro de Operaciones de la Misión, que queda ubicado en el Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA en Greenbelt.

El satélite fue sometido a un período de prueba de 100 días durante los cuales la NASA y el USGS comprobaron sistemáticamente todos los subsistemas de la nave, con lo cual procedieron a levantar el satélite de su órbita operacional a 438 millas (705 kilómetros) de altitud. El análisis de los datos recogidos durante este período de prueba mostró que el satélite, sensores y mediciones de rendimiento del sistema de tierra excedieron las especificaciones en la mayoría de los aspectos (NASA, 2013).

Los productos del Landsat 8 están disponibles para el público. Desde el 30 de mayo de 2013, se han añadido más de 400 escenas del Landsat 8

[10] http://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/main/

por día. Al igual que con todos los datos de los Landsat, cualquier persona puede buscar los productos de este satélite de forma gratuita mediante el uso de herramientas de búsqueda disponibles en la página web del USGS. Estas herramientas incluyen EarthExplorer, Glovis y el Visor LandsatLook.

Ariza (2013) señala que, 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 al sensor Landsat 7 ETM +, 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+ (Ver figura 11).

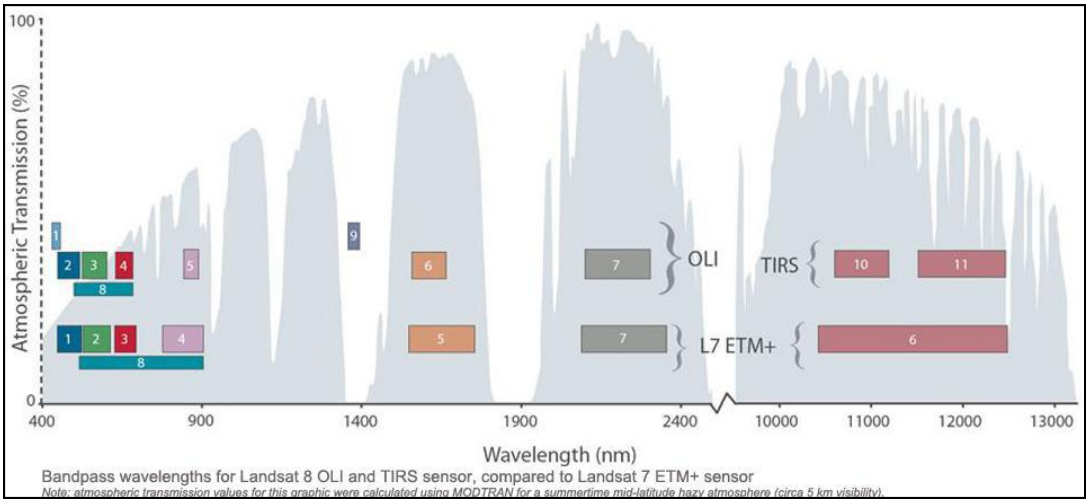


Figura. 11. Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7 (USGS. 2013).

La calidad de los datos (relación de la señal en función del ruido) y la resolución radiométrica (12 bits) del OLI y TIRS es más alta que los anteriores instrumentos del Landsat (8 bits para TM y ETM+), proporcionando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre (Ariza, 2013).

Aproximadamente se recogen 400 escenas al día, las cuales son cargadas en el servidor de USGS con el fin de que se encuentren disponibles para su descarga 34 horas después de la adquisición. 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; a continuación se describen algunas de sus especificaciones generales (Ver tabla 3):

Tabla 3. Especificaciones de productos LDCM a Nivel 1

Procesamiento:	Nivel 1 T-Corrección geométrica
Tamaño de píxel:	Bandas OLI multiespectrales 1-7,9: 30-metros Banda OLI pancromática 8: 15-metros Bandas TIRS 10-11: tomadas en 100 metros, pero remuestreadas a 30 metros para que coincida con las bandas multiespectrales de OLI
Características de los datos:	- Formato de datos GeoTIFF - Remuestreo por convolución cúbica (CC) - Norte arriba (MAP) de orientación - Proyección cartográfica: Universal Transversal Mercator (UTM) (estereográfica polar de la Antártida) - Datum al Sistema Geodésico Mundial (WGS) 84 - 12 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para OLI - 41 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para TIRS - Los valores de píxel en 16 bits
Entrega de datos:	Archivo comprimido .Tar.gz y de descarga a través de HTTP
Tamaño de archivo:	Aproximadamente 1 GB (comprimido), aproximadamente 2 GB (sin comprimir)

Fuente: USGS. 2013, citado por Ariza, A. 2013

2.2.5 Imágenes Landsat 8OLI

Ariza (2013) señala que, las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una

resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. Una banda nueva (1) (azul-profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución (Tabla. 4). El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 183 kilómetros de este a oeste (106 km por 114 km).

Tabla 4. Distribución de las bandas en OLI y TIRS

Bandas	**Longitud de onda (micrómetros)**	**Resolución (metros)**
Banda 1 - Aerosol costero	0,43 – 0,45	30
Banda 2 - Azul	0,45 – 0,51	30
Banda 3 - Verde	0,53 – 0,59	30
Banda 4 - Rojo	0,64 – 0,67	30
Banda5 – 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

* Las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a remuestrear a 30 metros.

Fuente: USGS. 2013, citado por Ariza, A. 2013

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. (Figura 12)

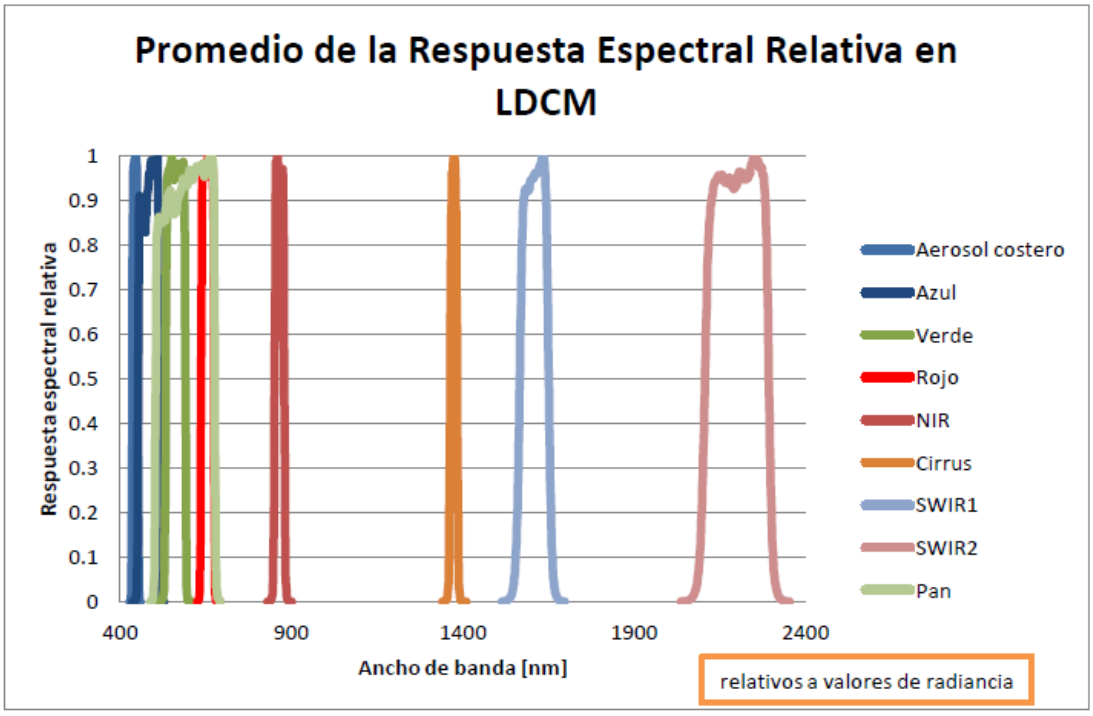


Figura 12. Respuesta espectral relativa en las bandas de las imágenes del Landsat 8OLI[11]

Sensor OLI

El sensor *Operational Land Imager* (OLI) avanza en la tecnología de sensores Landsat, utilizando un enfoque demostrado ya por el sensor *Advanced Land Imager* ubicado en el satélite experimental de la NASA Observing- 1 (EO-1). En el comienzo los satélites Landsat estaban

[11] USGS (2013). Citado por Ariza, 2013

equipados con sensores "whiskbroom" los cuales empleaban espejos de exploración como instrumentos visión para barrer el campo espectral a través de un ancho de banda superficial y transmitir la luz a unos detectores (Ariza, 2013).

A diferencia del OLI, el cual utiliza un sensor del tipo "pushbroom" compuesto por una serie de baterías larga de detectores, con más de 7.000 detectores por banda espectral, alineados en su plano focal en su respectivo ancho de banda. El diseño del "pushbroom" lo hace un instrumento más sensible proporcionando una mejor información de la superficie terrestre con menos partes móviles (figura 13). Sus imágenes tienen una resolución espacial de 49 pies (15 m) pancromáticas y 98 pies (30 metros) (incluido el visible, infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta) a lo largo de 115 millas (185 kilómetros) de ancho de imagen, cubriendo así amplias zonas de la tierra mientras que proporciona una resolución suficiente como para distinguir las características tales como centros urbanos, granjas, bosques y otros tipos de cubiertas del suelo.

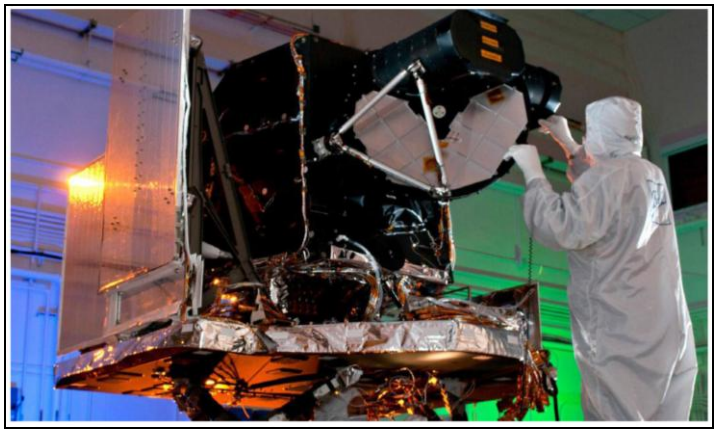


Figura 13. Construcción del sensor OLI en el satélite LDCM. Desarrollado por Ball Aerospace & Technologies Corp LDCM (USGS. 2013)

El OLI fue diseñado para tener una vida útil de cinco años y detectará las mismas bandas espectrales de los anteriores instrumentos del Landsat (es decir sensores, TM y ETM+), con la excepción de una banda en el infrarrojo térmico. Además de las 7 bandas multiespectrales del anterior Landsat (seis de los cuales han sido refinadas) OLI agregará dos nuevos bandas espectrales, una banda azul "costera" (banda 1) y una banda en el infrarrojo de onda corta "cirros" (banda 9). Estas nuevas bandas, ayudaran a los científicos a medir la calidad del agua y facilitaran la detección de nubes altas y delgadas que previamente han sido difíciles de observar en las imágenes Landsat (Ariza, 2013).

Todas las bandas del sensor OLI se pueden adquirir en 12 bits de resolución radiométrica, 8 bandas serán de 30 metros y 1 de las bandas, la banda pancromática, es de 15 metros (Tabla 5).

Tabla 5. Rangos espectrales y tamaños de píxel de las bandas del sensor OLI

Nº Banda	**Descripción**	**Ancho de banda (nm)**	**Centro Tolerancia (±nm)**	**Mínimo inferior (nm)**	**Máximo superior (nm)**
1	Aerosol costero	443	2	433	453
2	Azul	482	5	450	515
3	Verde	562	5	525	600
4	Rojo	655	5	630	680
5	NIR	865	5	845	885
6	SWIR1	1 610	10	1 560	1 660
7	SWIR2*	2 200	10	2 100	2 300
8	Pancromático	590	10	500	680
9	Cirrus	1 375	5	1 360	1 390

Fuente: USGS. 2013, citado por Ariza, A. 2013

Sensor TIRS

Todo en la Tierra emite radiación térmica infrarroja, termino comúnmente conocido como calor. La física nos dice que la cantidad de la radiación emitida es proporcional a la temperatura del objeto. El sensor térmico infrarrojo (TIRS) fue añadido a la carga útil del LDCM cuando se hizo evidente que los gestores de los recursos hídricos se basaban en la mediciones de alta precisión de la energía térmica de la tierra obtenidas por los predecesores del LDCM – el TM del satélite Landsat 5 y Enhanced Thematic Mapper – Plus ETM+ del Landsat 7 – con el fin de hacer un seguimiento del uso de la tierra y el agua. La decisión de añadir el sensor TIRS se hizo después de que el diseño de la misión se había iniciado. Los ingenieros tenían menos de cuatro años para diseñar y construir TIRS por lo que recurrieron a una nueva tecnología desarrollada por la NASA llamada Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIPs) ver figura 14.



Figura 14. Construcción del sensor TIRS, desarrollado por la NASA y el (GSFC) Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md. 2013

Los detectores QWIPs están hechos de un material que es compatible con el procesamiento de silicio, lo que significa que son las mismas herramientas que utilizan en las instalaciones para hacer chips de computadora. QWIPs son muy fiables, uniformes, y muy adecuados a las necesidades del sensor TIRS. El diseño QWIPs opera en los complejos principios de la mecánica cuántica. Chips semiconductores atrapan electrones en un estado de energía "well" hasta que los electrones se elevan a un estado superior por la luz infrarroja térmica de una determinada longitud de onda. Los electrones elevados crean una señal eléctrica que puede medirse y registrarse para crear una imagen digital.

Los satélites Landsat anteriores miden la temperatura superficial del suelo utilizando una sola banda térmica para detectar longitudes de onda largas de la luz emitida por la superficie de la tierra. Los QWIPs en el TIRS sin embargo, detectan dos segmentos del espectro infrarrojo térmico, ambos incluidos dentro de una ventana de transmisión atmosférica, con el fin de producir mejores estimaciones de la temperatura superficial.

Al igual que el sensor OLI, el TIRS es también un sensor “Pushbroom” con un 115-millas (185 kilómetros) de campo de visión (Cross-track). Con una resolución espacial de 328 pies (100 metros) de ancho, esta resolución espacial del TIRS está diseñada para captar las mediciones de consumo de agua en los campos riego, particularmente a través de las grandes llanuras de los Estados Unidos (tabla 6).

Tabla 6. Rangos espectrales y tamaños de píxel de las bandas en el sensor TIRS

Nº Band	Descripción	Ancho de banda (nm)	Centro Tolerancia (±nm)	Mínimo inferior (nm)	Maximo superior (nm)
10	Thermal 1	10 800	200	10 300	11 300
11	Thermal 2	12 000	200	11 500	12 500

Fuente: USGS. 2013, citado por Ariza, A. 2013

Una de las diferencias más importantes entre las especificaciones del OLI y el TIRS es que TIRS sólo tiene una vida útil de tres años. Esta característica se especificó con el fin de ayudar a acelerar el desarrollo del TIRS.

2.2.6 Corrección radiométrica en imágenes LDCM Landsat 8[12]

2.2.6.1 Conversión a radiancia en el techo de la atmósfera (TOA)

Los productos estándar Landsat 8 LDCM, suministrados por el USGS EROS CENTER consisten en una serie cuantificada, calibrada y escalada de niveles digitales ND, los cuales representan los datos de una imagen multiespectral adquirida por ambos sensores: OLI Operational Land Imagen y el TIRS Thermal Infrared Sensor.

Los datos de las bandas del sensor TIRS y OLI están derivados en 16 bits en formato no cifrado y pueden ser reescalados a los valores de reflectancia y o radiancia en el techo de la atmósfera TOA, usando para

[12] Ariza.A (2013)

ello los coeficientes radiométricos provistos en el archivo de metadato MTL.txt, tal y como se describe a continuación.

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L$$

Donde:

*Lλ = Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmósfera (TOA) medida en valores de (Watts /m2 * srad * µm))*

ML = Banda – Es el factor multiplicativo de escalado especifico obtenido del metadato (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda)

AL = Banda – Es el factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda)

Q cal = Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

2.2.6.2 Conversión a reflectancia TOA

Los datos del sensor OLI pueden ser convertidos a valores de reflectancia (TOA) en el techo de la atmósfera, usando para ello los coeficientes de reflectancia reescalados, suministrados en el archivo de metadatos MTL. La siguiente ecuación es usada para convertir los ND niveles digitales a valores de reflectancia para los obtenidos por el sensor OLI:

$$\rho\lambda' = M_\rho Q_{cal} + A_\rho$$

Donde:

Pλ` = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar. Note que Pλ` no contiene una corrección por el ángulo solar.

Mp = Es el factor multiplicativo de escalado especifico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).

Aρ = Es el factor aditivo de escalado especifico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).

Q cal = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

2.2.6.3 Conversión a reflectancia TOA con correción angular

El cálculo de la reflectancia real de una cubierta captada por un sensor espacial está condicionado por el comportamiento de la atmósfera, así como del ángulo de observación.

De esta manera, la reflectancia en el techo de la atmósfera TOA con una corrección para el ángulo solar es:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{SE})}$$

Donde:

Pλ = Es el valor reflectancia planetaria o en el techo de la atmósfera TOA, con corrección por ángulo solar.

Θse = Es el ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen (SUN_ELEVATION).

Θsz = Es el ángulo solar zenith local.

Es el ángulo solar zenith local, corresponde al ángulo complementario de observación y puede obtenerse de la siguiente manera:

$$\Theta sz = 90^{a} - \Theta se$$

Para más exactitud en el cálculo de la reflectancia, por pixel ángulo solar puede ser usado instante del ángulo solar del centro de la escena, pero por pixel el ángulo zenith solar no son suministrados con los productos Landsat 8.

De este modo la ecuación general de conversión a reflectancia, incluyendo la corrección por ángulo solar quedaría de la siguiente manera:

$$P\lambda` = \frac{(M\rho * Qcal + A\rho)}{Sin\ (\Theta se)}$$

Donde:

Pλ` = Es el valor reflectancia planetaria o en el techo de la atmosfera TOA, con corrección por ángulo solar.

Mρ = Es el factor multiplicativo de escalado especifico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).

Aρ = Es el factor aditivo de escalado especifico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).

SIN Θse = Es el ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen (SUN_ELEVATION).

Q cal = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

2.2.6.4 Conversión a temperatura de brillo en el satélite

Las bandas obtenidas por el sensor TIRS pueden ser convertidas de radiancia espectral a temperatura de brillo en grados Kelvin (k) usando para ello la constante térmica suministrada en el archivo de metadatos:

$$T = \frac{K_2}{ln(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1)}$$

Donde:

T = Temperatura de brillo aparente en grados kelvin (K)

*Lλ = Corresponde a la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA (Watts/(m2 * srad* μm))*

K1 = Es la constante de conversión K1 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K1_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda, 10 o 11)

K2 = Es la constante de conversión K2 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K2_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda, 10 o 11)

2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES

Áreas de entrenamiento: Las áreas de entrenamiento o regiones de interés, son polígonos que constituyen una muestra representativa, de cada una de las clases presentes en la escena. Son áreas homogéneas que representan a las clases de la leyenda (Corine Land Cover) y que servirán de insumo para ser usadas por el programa Random Forest, a fin de poder clasificar la escena objeto de estudio.

Bosques: ecosistema compuesto predominantemente por árboles y otra vegetación leñosa, que crecen juntos de manera más o menos densa. Para el Perú la definición de bosque que viene siendo aplicada es: "t*ierras con una cubierta de copa arbórea de más del 30 por ciento del área y un área mínima de 0,5 ha (ha). Los árboles deben poder alcanzar una altura mínima de 5 metros (m) a su madurez in situ"* (FONAM, 2006).

Bosques Secundarios: Vegetación boscosa que ha vuelto a crecer, en tierra que fuera desmontada de la vegetación forestal original, es decir, que tiene menos de la cubierta forestal original. Estos bosques secundarios, también pueden ser el resultado de la regeneración del bosque natural, después de catástrofes naturales como incendios, deslizamientos de tierras e inundaciones.

CORINE Land Cover: Leyenda que contiene los principales tipos de coberturas planteadas para la realidad peruana, se basa en estudios Europeos que fueron adaptados a Sudamérica.

DEM: Conjunto de datos que contienen medidas de elevación del terreno, aplicando procedimientos fotogramétricos a pares de imágenes estereoscópicas solapadas.

Imágenes de satélite Landsat: Imágenes capturadas por satélites construidos y puestos en órbita por EE. UU. para la observación en media resolución de la superficie terrestre.

Pixel: Menor unidad que forma parte de una imagen digital.

Random Forest: Algoritmo que se basa en el árbol de decisiones usado en el entorno de programa libre de computación para análisis estadístico y gráfico.

Raster: Datos geográficos digitales que usan celdas de igual tamaño que poseen un valor.

Segmentación: proceso por el cual se agrupan píxeles contiguos que tienen características espectrales semejantes, definiendo un área geográfica homogénea.

SIG: Sistema de Información Geográfica; son herramientas de análisis que ofrecen la posibilidad de identificar las relaciones espaciales de los fenómenos que se estudian.

Teledetección: Observar un objeto -es decir, medir determinadas características del mismo- sin mediar contacto físico con él.

2.4 BASES EPISTÉMICOS

La teledetección (remote sensing) se fundamenta en la observación remota de la superficie terrestre y abarca los procesos que permiten obtener información a distancia y su posterior tratamiento. Se presentaron metodologías vinculadas con la aplicación de métodos inductivos y deductivos, las cuales evidenciaron, tanto en la etapa de análisis como de procesamiento digital de imágenes satelitales, la identificación de aplicaciones de los razonamientos inductivos y deductivos, evaluados a partir de conceptos epistemológicos. A partir de los diferentes ejemplos propuestos, se analizaron las ventajas, desventajas y conflictos observados en la adopción de estas metodologías por disciplinas científicas como la teledetección (Pagot, 2003)

Algunos autores plantean, en la etapa de extracción de información temática a partir de imágenes, técnicas que conducen a la aplicación de metodologías inductivas o deductivas. La selección del tipo de metodología será función de si se parte de un diseño experimental para extraer leyes (metodología inductiva), o bien, si se proponen estimaciones al analizar las relaciones teóricas entre los componentes que intervienen en el problema (metodología deductiva). (Chuvieco, 2002, citado por Pagot, 2003)

Tipos de metodologías en Teledetección

En teledetección, se puede realizar una clasificación de los métodos disponibles en dos grupos en función de la metodología utilizada en la generación de información (Chuvieco, 2002 citado por Pagot, 2003):

1) Métodos inductivos: se basan en la observación experimental para extraer leyes. Intentan establecer una relación cualitativa y cuantitativa entre el parámetro a estimar y los valores del sensor, a partir de observaciones in situ, tomadas en el momento de adquirir la imagen. Es decir, se pueden obtener funciones de ajuste local que ponen en relación los datos de la imagen con el parámetro de interés. Las técnicas de ajuste más habituales son las regresiones matemáticas o las redes neuronales (Hines *et al*. 1998 citado por Pagot, 2003).

Ventajas: sencillez, fácil de calibrar y posibilidad de estimar su exactitud, ya que se contrastan con observaciones de la misma variable que se estima.

Desventajas: escasa capacidad de generalización, ya que sólo podrían aplicarse con las mismas o similares condiciones a la situación en que se generaron (condiciones ambientales del lugar, sensor, rango de la variable que se estima, condiciones de observación o atmosférica, etc.)

2) Métodos deductivos: se basan en la aplicación de modelos físicos o matemáticos que permitan estimar los parámetros de interés a partir de los datos adquiridos mediante teledetección. Analizan los factores físicos que

intervienen en los procesos de reflexión, absorción y dispersión de la radiación incidente, y plantean métodos para estimar la reflectividad global observada por el sensor a partir de una serie de parámetros de entrada (propiedades ópticas de las hojas, ángulo de observación, etc.). Establecen una relación de validez general, lo más independiente posible de las condiciones de observación. Parten de demostrar la relación física entre el parámetro a estimar (ejemplo: reflectancia) y la información espectral contenida en la imagen (ejemplo: nivel de gris o digital). Luego de establecida esta relación, el método se invierte, de tal forma que pueda estimarse la variable a partir de la imagen. Esto implica un proceso de ajuste que generalmente no es muy preciso, ya que se deben asumir condiciones que rara vez se dan en la naturaleza, como isotropía en las hojas, reflectividad lambertiana (sobre superficie especular), etc. (Pagot, 2003).

CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación para el presente estudio fue el deductivo-descriptivo. Mediante la investigación se generó resultados cualitativos y cuantitativos a partir de imágenes satelitales, tales resultados son detallados en los resultados.

3.2 DISEÑO Y ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta que el tipo de investigación corresponde al deductivo-descriptivo, el esquema de la investigación consistió en describir los principales procesos desarrollados para obtener los resultados que permitieron responder a los objetivos planteados.

El esquema de la investigación se centró en el desarrollo de la metodología planteada para la identificación de los tipos de coberturas y usos del territorio de la provincia de Padre Abad. Entre las principales acciones desarrolladas están las que se muestran en la figura 15.

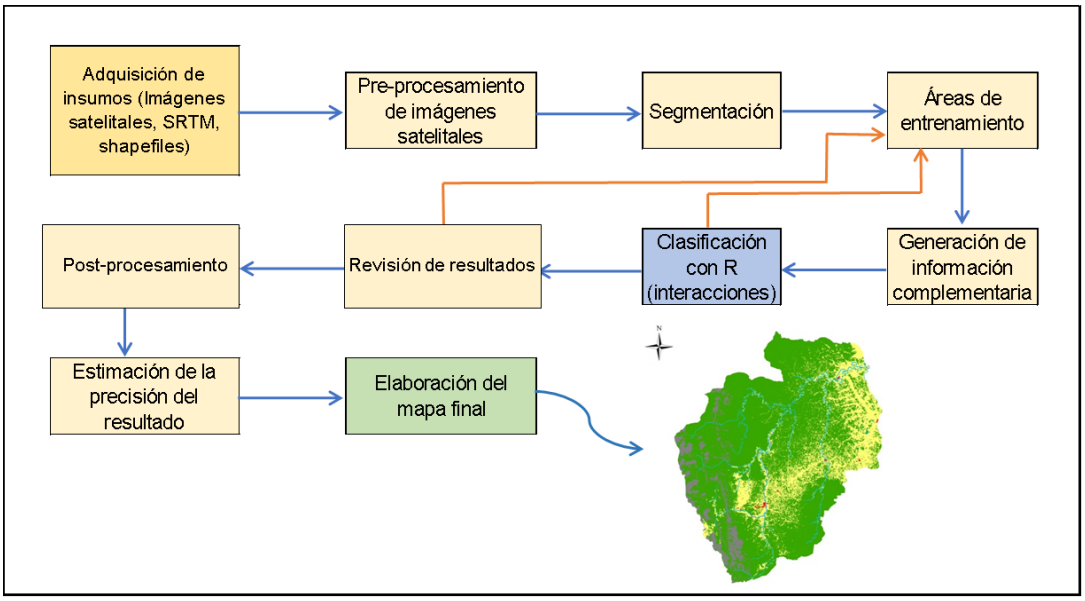


Figura 15. Diagrama de procesos desarrollados[13]

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población estuvo constituida por el área total de estudio, que corresponde a la provincia de Padre Abad con 927 429,81 ha. La muestra estuvo conformada por las áreas de entrenamiento que permitieron alimentar el proceso de clasificación de los tipos de coberturas y usos del territorio. Las áreas de entrenamiento fueron realizadas para cada clase representada en el mapa resultante y fueron distribuidas a lo largo de toda el área de estudio (para este proceso se excluyeron las áreas enmascaradas de ríos y no data que sumaron un total de 63 815,93 ha). Ver tabla 7 y figura 16.

[13] Elaboración propia, 2015

Tabla 7. Muestra por cada clase identificada

Cod. de leyenda	Clases	Superficie (ha)
1.1	Áreas urbanizadas	58,40
2	Áreas agrícolas	3 956,94
3.1	Bosques	88 797,00
3.4.1	Áreas arenosas naturales	25,00
3.4.4	Áreas quemadas	45,50
	Total	92 882,84

Fuente: Elaboración propia, 2015

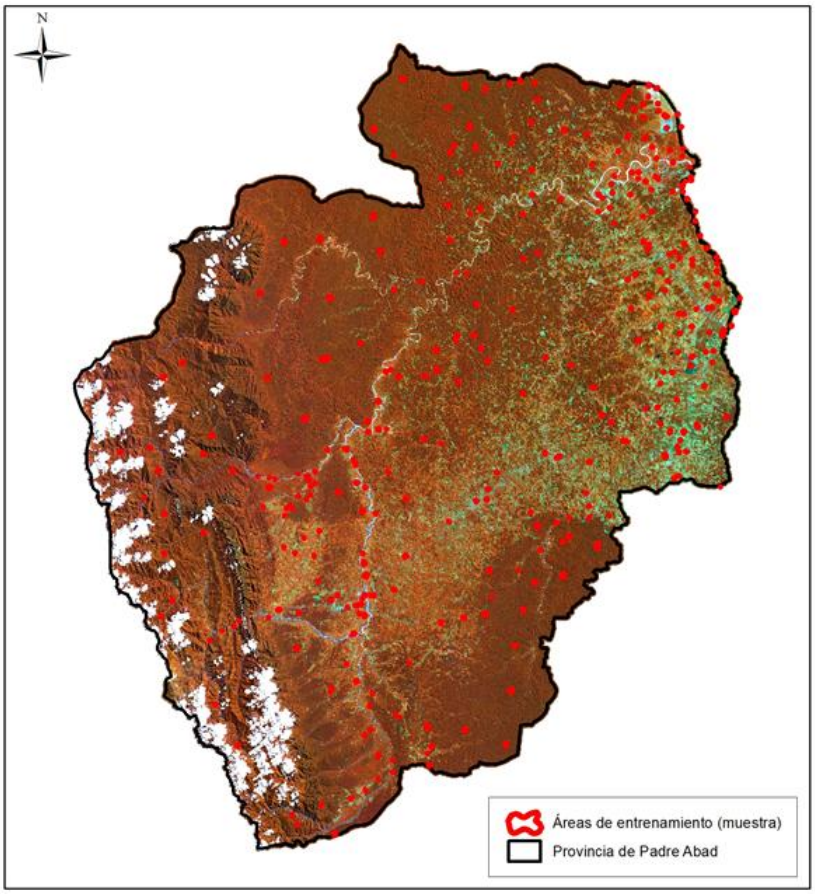


Figura 16. Distribución de las áreas de entrenamiento (muestra)[14]

[14] Elaboración propia, 2015

3.4 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

En la presente investigación los datos tuvieron como principal fuente las imágenes del satélite Landsat 8OLI, que corresponde a la zona en estudio (provincia de Padre Abad). Adicional a este insumo están otros materiales y equipos que permitieron el procesamiento, análisis y presentación de resultados.

A continuación se detallan los materiales y recursos utilizados en la generación de la información deseada:

3.4.1 Materiales Cartográficos

Los materiales cartográficos utilizados en la presente investigación fueron:

- Imagen del satélite Landsat 8OLI del año 2014[15]: En principio estas imágenes están conformadas por 11 bandas (ver tabla 8), de las cuales para el desarrollo de la metodología del presente estudio se hizo uso de 6 bandas; 3 del visible (bandas 2, 3 y 4), 1 del infrarrojo cercano (banda 5) y 2 del infrarrojo de longitud de onda corta (bandas 6 y 7). La escena usada corresponde al path - row 007-066 (ver figura 17).

[15] Imagen descargada desde el servidor de U.S. Geological Survey (http://glovis.usgs.gov/)

Tabla 8. Características de las imágenes Landsat 8OLI

Bandas	Centro de banda (um)	Descripción de la banda
1	0,433	Aerosol costero (Operational Land Imager (OLI))
2	0,482	Azul (OLI)
3	0,562	Verde (OLI)
4	0,655	Rojo (OLI)
5	0,865	Infrarrojo cercano (NIR) (OLI)
6	1,610	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1 (OLI)
7	2,200	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2 (OLI)
8	0,590	Pancromático (OLI)
9	1,375	Cirrus (OLI)
10	10,800	Sensor Infrarrojo térmico (TIRS) 1
11	12,000	TIRS 2

Fuente: USGS y NASA. 2013

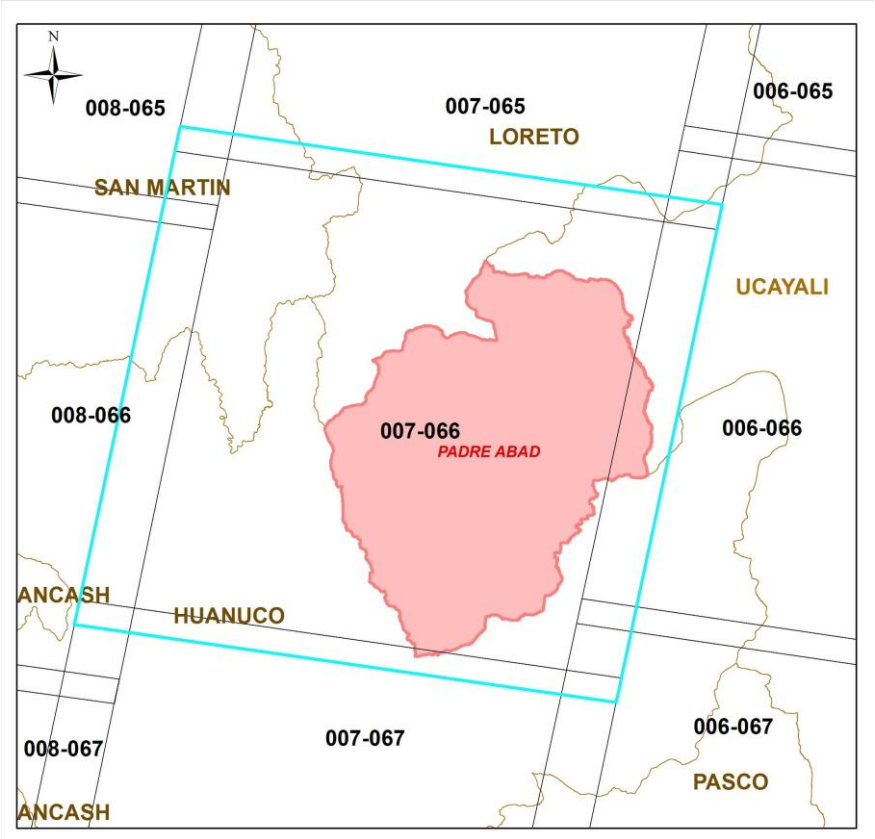


Figura 17. Path-row 007-066 empleado en el estudio, con fecha de captura 22 de agosto del 2014

- DEM: El DEM[16] utilizado corresponde a la misma ubicación de la escena utilizada. Los datos del modelo digital de elevación (modelo de datos raster), corresponden al Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), con una celda de resolución aproximada de 90x90 metros (resampleada a 30x30 m), en formato GeoTIFF, proyección UTM, Datum horizontal WGS84 y Datum vertical geoide de referencia EGM96 (Earth Gravitational Model 1996).

- Imágenes satelitales de alta resolución: Uso de imágenes de acceso libre como el Bing Aerial y el Google Earth.

- Imágenes RapidEye: Estas imágenes fueron adquiridas mediante solicitud a la Dirección General de Ordenamiento Territorial del Ministerio del Ambiente, con la finalidad de poder utilizarlas en el proceso de verificación de los resultados encontrados en el presente estudio.

- Shapefiles básicos: El uso de shapefiles básicos sirvió de referencia durante el proceso de clasificación y edición, entre los shapefiles utilizados están:
    - Límite distrital, provincial y departamental a nivel nacional (Fuente: INEI, 2007)
    - Límite distrital y provincial de Ucayali (Fuente: GOREU, 2013)

[16] DEM descargado desde http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/, página del Departamento Geológico de los Estados Unidos de Norte América, U.S. Geological Survey USGS, Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Global Data Explored.

- Centros poblados (Fuente: GOREU[17], 2013)
- Perímetros de áreas urbanas (Fuente: COFOPRI[18], 2013)
- Vías primarias y secundarias (Fuente: MTC[19], 2013)
- Hidrografía (Fuente: Elaboración propia)

3.4.2 Softwares

Los programas utilizados en la presente investigación fueron:

- Microsoft Office 2010 (Excel, Word, Power Point)
- ArcGIS 10.2 (Versión de prueba)
- Envi 4.8 (Versión de prueba)
- Envi EX (Versión de prueba)
- R 3.0.2 (Software libre)

3.4.3 Equipos

- Computadora Core i5 / 4GB Ram / 500 GB HDD / Monitor 15.6”
- Impresora y plotter HP Design Jet
- Gps Garmin Oregon 650
- Cámara fotográfica Panasonic Lumix ZS7

3.4.4 Materiales utilizados en la fase de campo

- Ficha de verificación de resultados (Anexo 1)
- Tablero
- Lápices

[17] Gobierno Regional de Ucayali
[18] Organismo de formalización de la propiedad informal
[19] Ministerio de transportes y comunicaciones

3.5 TÉCNICAS DE RECOJO, PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE DATOS

3.5.1 Ubicación del área de estudio

La presente investigación tiene como área de estudio la provincia de Padre Abad, que constituye una de las cuatro provincias del departamento de Ucayali. La provincia de Padre Abad está constituida por los distritos de Alexander Von Humbolt, Curimaná, Irazola, Neshuya y Padre Abad (ver tabla 9).

Tabla 9. Superficie de la provincia de Padre Abad

Provincia	Distritos	Superficie	
		ha	%
Padre abad	Alexander Von Humbolt	20 866,86	2,25
	Curimaná	188 268,43	20,30
	Irazola	185 733,68	20,03
	Neshuya	61 216,85	6,60
	Padre abad	471 343,99	50,82
Total área SIG		927 429,81	100,00

Fuente: GOREU, 2017

El área de estudio se encuentra limitada por las siguientes coordenadas geográficas:

Norte : 9092455 Sur : 8958858

Oeste : 0395914 Este : 0506700

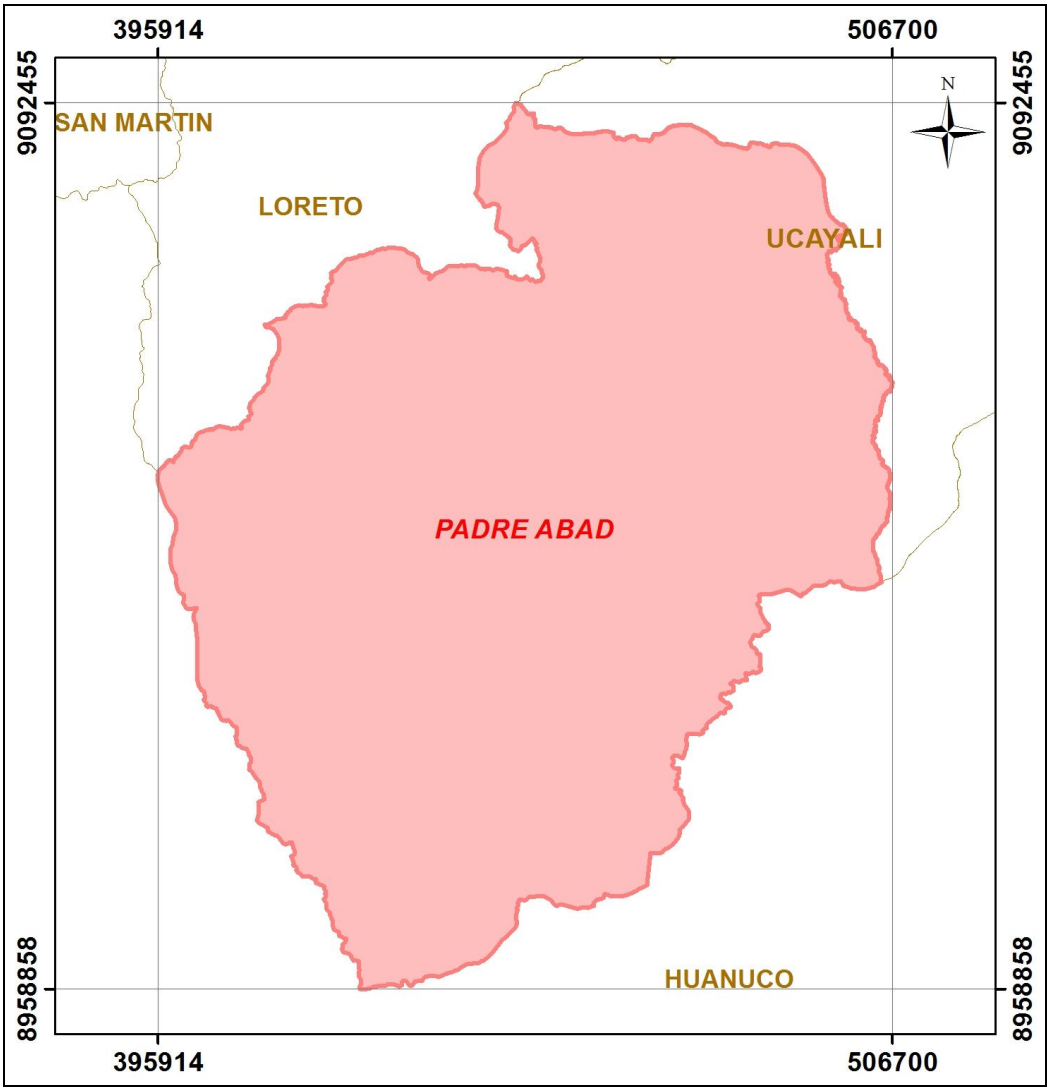


Figura 18. Coordenadas geográficas que definen el área de estudio[20]

[20] Elaboración propia

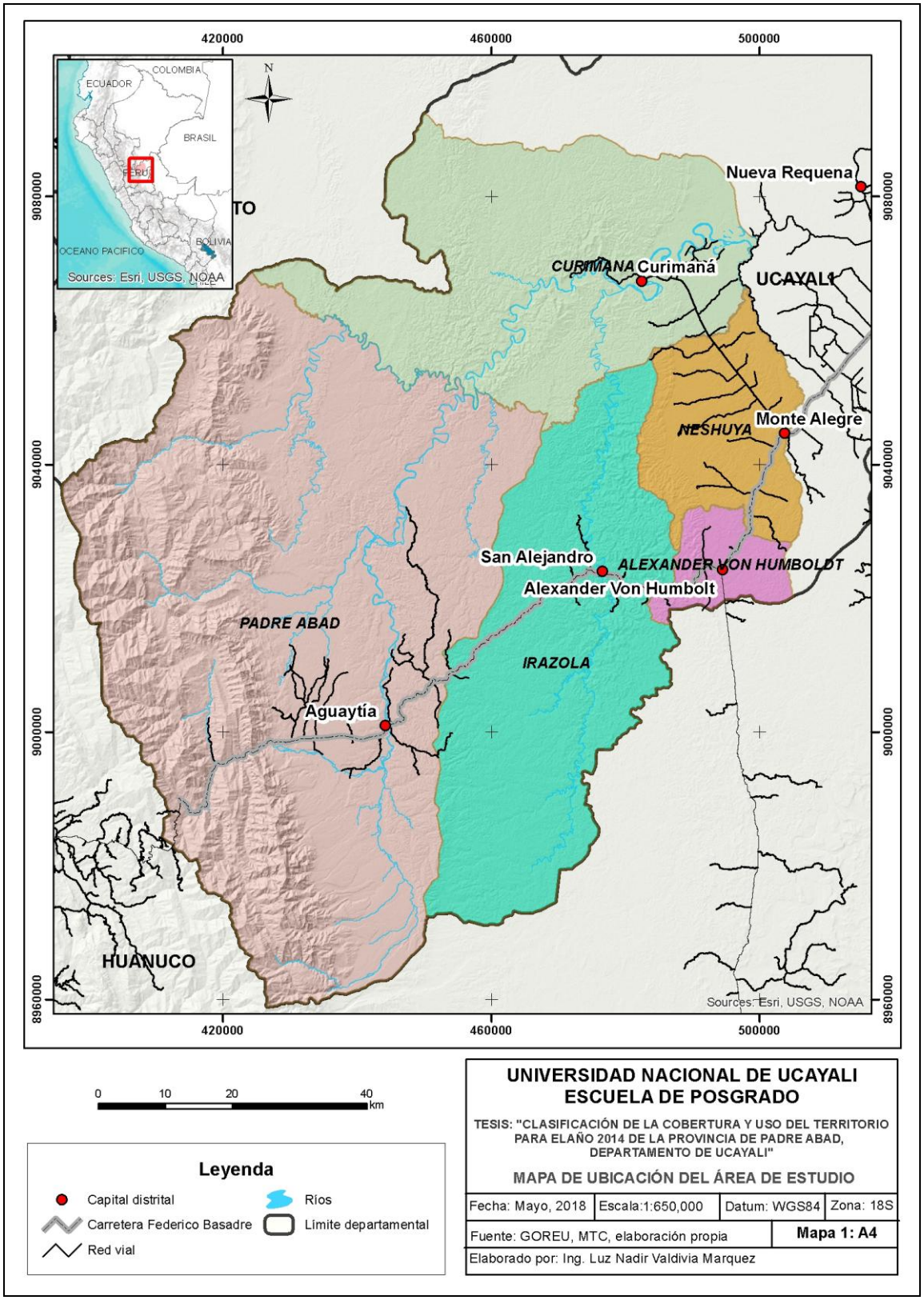


Figura 19. Mapa de ubicación del área de estudio, provincia de Padre Abad[21]

[21] Elaboración propia

3.5.2 Adquisición de materiales cartográficos

Los materiales cartográficos adquiridos fueron:

- Imágenes satelitales: para el estudio fue necesario contar con una imagen del satélite Landsat 8OLI específicamente la escena cuya ubicación corresponde al path-row 007-066, con fecha de captura 22 de agosto del 2014, la obtención de esta imagen fue por medio de descarga del portal web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)[22]. También fue necesario la adquisición de imágenes satelitales de alta resolución RapidEye, con la finalidad de usarlas en el proceso de verificación de los resultados, sin embargo, los altos costos de estos insumos limitan su compra, por ello se optó por solicitar a la Dirección de Ordenamiento Territorial del Ministerio del Ambiente, las imágenes correspondientes al área de estudio. Otras imágenes que también fueron utilizadas en el desarrollo de la investigación son las imágenes de alta resolución de libre acceso proporcionadas Bing Aerial y Google Earth.

- Modelo de elevación digital (DEM): el DEM utilizado para el estudio al igual que en el caso de la imagen del satélite Landsat 8OLI fue descargado del portal web de la USGS[23].

- Shapefiles básicos: los shapefiles utilizados en el estudio fueron adquiridos de diferentes fuentes, debiendo ser descargados algunos de

[22] http://glovis.usgs.gov/
[23] http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/

ellos desde el portal web del Geoservidor[24] del MINAM y otros que fueron solicitados a instituciones como el Gobierno Regional de Ucayali (GOREU).

3.5.3 Pre-procesamiento de imagen satelital Landsat 8OLI

- Corrección geométrica: la imagen utilizada fue descargada en formato GeoTIFF desde la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos-USGS. La imagen posee una corrección estándar de terreno Nivel 1, esta corrección ofrece una precisión sistemática radiométrica y geométrica mediante la incorporación de puntos de control terrestre y el empleo de un modelo de elevación digital (DEM) para la exactitud topográfica (Ariza, A. 2013). Para el presente estudio no se hizo una mayor corrección geométrica a la imagen utilizada.

- Corrección radiométrica: consistió en transformar los valores de los pixeles de la imagen de niveles digitales a niveles de reflectancia en el techo de la atmósfera TOA. Para realizar este proceso se hizo uso de la herramienta (Radiometric Calibration) integrada al ENVI (ver figura 20).

[24] http://geoservidor.minam.gob.pe/geoservidor/repositorio.aspx

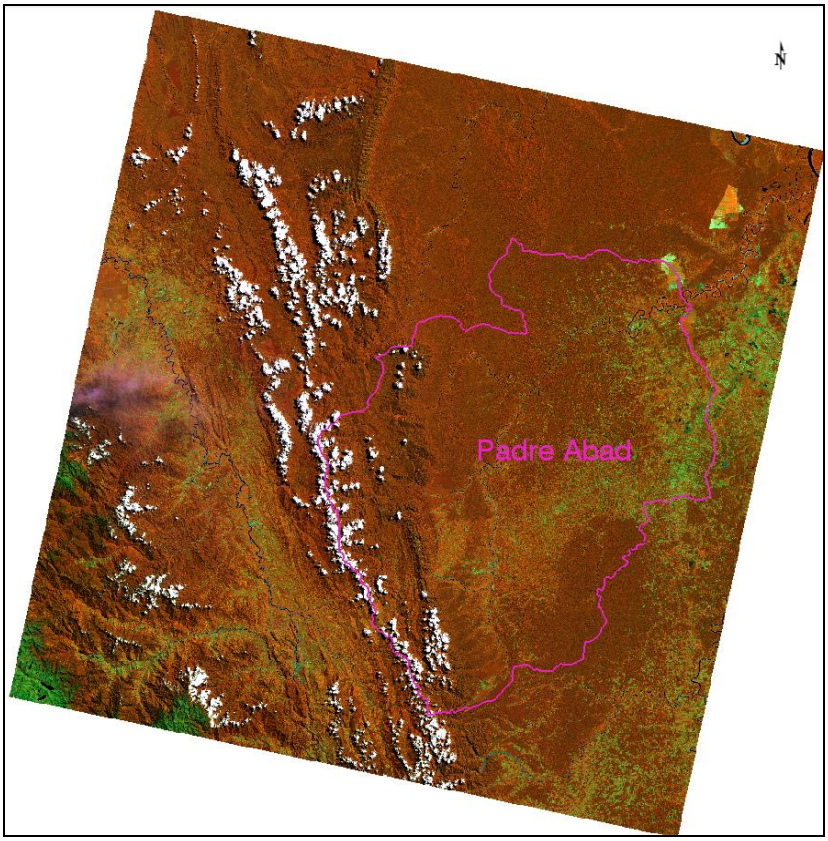


Figura 20. Imagen satelital calibrada radiométricamente[25]

- Corrección atmosférica: esta corrección consistió en extraer de la imagen satelital utilizada los siguientes elementos; nubes, sombras, ríos y cuerpos de agua. Para el caso de las nubes se hizo uso de la banda de Calidad (BQA) y en el caso de las sombras, ríos y cuerpos de agua se usó la banda del Infrarrojo cercano (NIR=B5). El proceso fue realizado con el software ENVI.

  Este proceso es realizado con la finalidad de evitar confusión durante el proceso de clasificación de las coberturas y usos del territorio.

[25] Elaboración propia

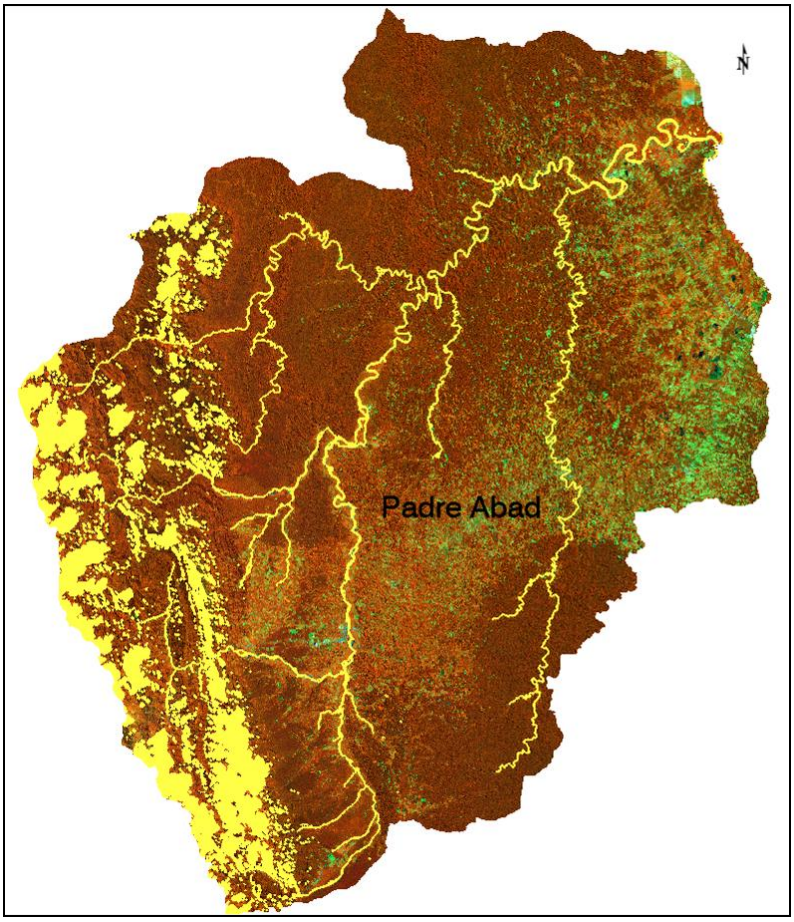


Figura 21. Extracción de elementos de la imagen usada (resaltado en amarillo)[26]

3.5.4 Clasificación de cobertura y uso del territorio

- **Segmentación:** La segmentación es un proceso mediante el cual se agrupan píxeles contiguos que tienen características espectrales semejantes, dando como resultado un área geográfica homogénea (Ver figura 22). Este proceso se realizó con el software Envi EX en el módulo Feature Extraction.

[26] Elaboración propia

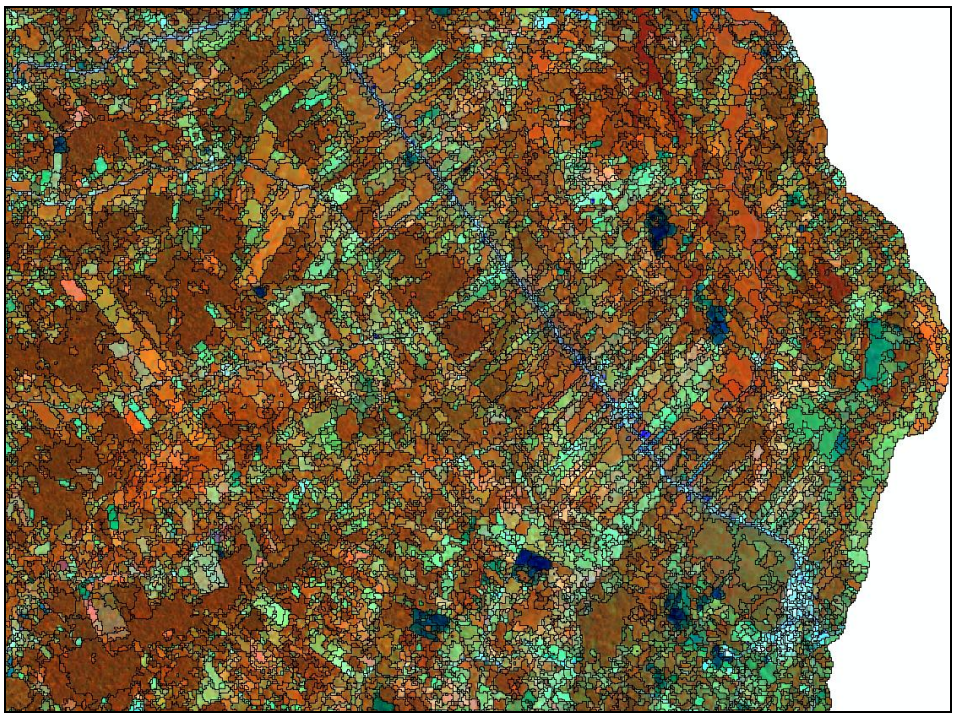


Figura 22. Segmentación de imagen[27]

- **Áreas de entrenamiento:** Las áreas de entrenamiento o regiones de interés, son polígonos que representan a las clases presentes en la escena a analizar. Estas áreas junto con la imagen sirven de insumos para la clasificación. Con la finalidad de determinar las áreas de entrenamiento que representen la clase a identificar se recomienda emplear combinaciones de bandas que permitan resaltar las coberturas de interés; por ejemplo la combinación RGB 453 (NIR, SWIR, Red) permite resaltar coberturas vegetales y 543 (SWIR, NIR, Red) resalta áreas descubiertas de vegetación, suelo desnudo.

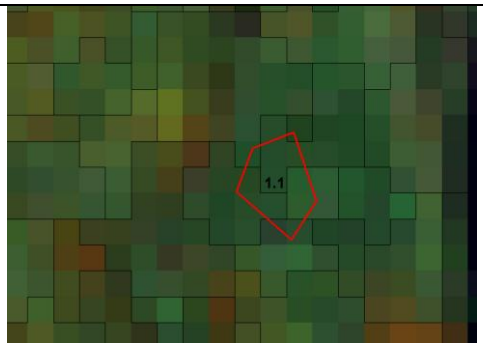
[27] Elaboración propia

Para definir las áreas de entrenamiento se hizo uso de imágenes de alta resolución de libre acceso como las proporcionadas por Bing Aerial y Google Earth.

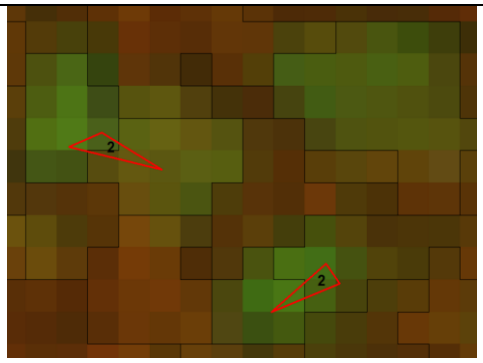
Por otro lado, para definir las áreas de entrenamiento se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

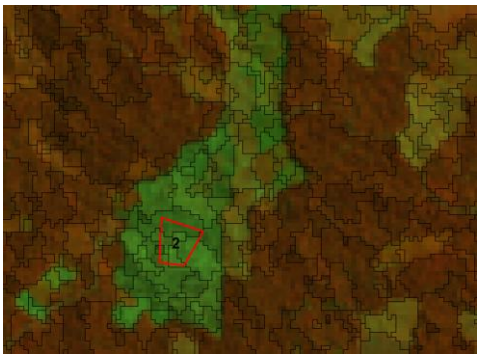
- Estar distribuidas de manera homogénea en la escena analizada.
- Se tuvieron tantos polígonos por clase como fueron necesarios para garantizar una buena representación de la clase en la escena. Con cada interacción del modelo, se notó si era necesario adicionar más polígonos a cada clase, a fin de obtener una mejor representación de las clases presentes.
- Los polígonos enmarcaron sólo la clase que se deseó representar. Además de ser lo suficientemente grandes como para abarcar la heterogeneidad propia de la clase.

Tabla 10. Áreas de entrenamiento[28]

Representación en imagen Landsat 8 OLI	**Áreas de entrenamiento por clase de cobertura y/o uso de la tierra**
	Área de entrenamiento para la clase “áreas urbanizadas” con código de leyenda 1.1

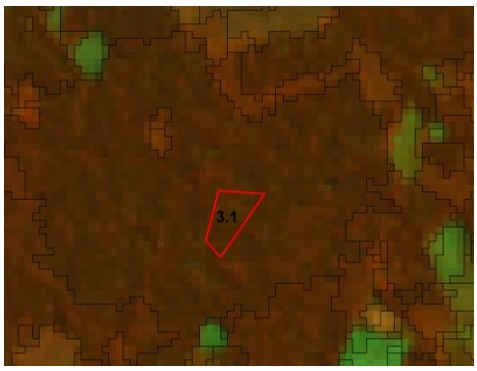
[28] Para la definición de las áreas de entrenamiento se hizo uso de la combinación RGB 453



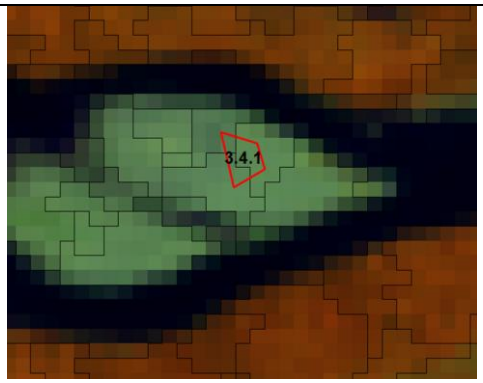
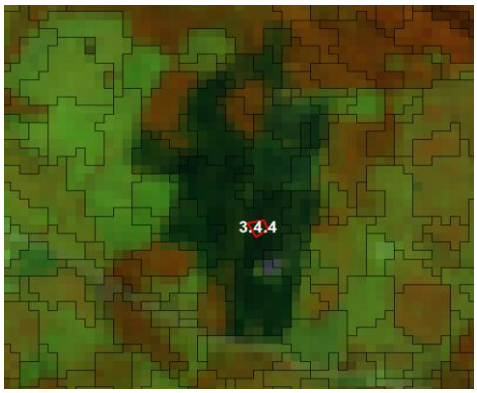




Área de entrenamiento para la clase “áreas agrícolas” con código de leyenda 2, esta clase abarca varios tipos de usos entre ellos: áreas de cultivos anuales y permanentes, pastizales.



Área de entrenamiento para la clase “bosques” con código de leyenda 3.1

	Área de entrenamiento para la clase “áreas arenosas naturales” con código de leyenda 3.4.1
	Área de entrenamiento para la clase “áreas quemadas” con código de leyenda 3.4.4

Fuente: Elaboración propia

- **Información complementaria:** Para incrementar la capacidad de clasificación la metodología permite incluir información derivada de las imágenes satelitales (como índices de vegetación) así como información complementaria proveniente del SRTM 90m. El objetivo es proveer al algoritmo de clasificación el tipo de información que emplea el intérprete para decidir si un polígono corresponde a una u otra clase (Arnillas, *et al*. 2012).

  Para generar la información complementaria se hizo uso de los siguientes insumos: Imagen del satélite Landsat 8OLI, segmentación

final de la escena y el DEM correspondiente a la zona de estudio. Además del uso de los software Envi y Arcgis.

Al final del proceso se tuvo una carpeta denominada info_comp con los siguientes archivos: bright (brillo), green (verdor), third (humedad), dem (obtenido del SRTM original, el mismo que con la herramienta Resample permitió que coincida con el extent de la imagen), slope (pendiente), plancurv (curvatura del plano), procurv (curvatura del perfil) y seg (segmentación). Todos estos archivos en formato GRID.

Tabla 11. Información complementaria generada

Insumos	**Proceso/tool empleado**	**Información generada**
Imagen Landsat 8OLI	Tasselep Cap	- bright (brillo) - green (verdor) - third (humedad)
SRTM	Resample	- dem
Dem	Slope del ArcToolbox	- slope
Dem	Curvature del ArcToolbox	- Plancurv - Procurv
Segmentación final (shp)	Polygon to raster	- Seg

Fuente: Elaboración propia

- **Clasificación con R y Random Forest:**
  - *Primera corrida con el R:* En esta etapa se usó como insumo el archivo .dbf de la segmentación y toda la información complementaria

que fue generada, además del script[29] con los procesos que realiza el programa R[30]. En esta primera corrida en el R, se obtuvieron los siguientes archivos: todo_seg.dbf y todo_seg.Rdata.

El archivo todo_seg.dbf se usó para reemplazar al archivo .dbf del shapefile de la segmentación.

- *Segunda corrida con el R:* En esta segunda corrida en el R, se usaron como insumos a los archivos: todo_seg.Rdata y Sel_Seg_Ae.dbf, y también el script correspondiente para esta etapa.

  El archivo Sel_Seg_Ae.dbf (limpio de regiones con duplicidad de clasificación), se obtuvo a partir de la intersección de la segmentación con las áreas de entrenamiento.

  Se revisó que el archivo Sel_Seg_Ae.dbf no cuente con regiones que dupliquen su categoría, al encontrarse este caso se limpió la duplicidad debiendo definir la clasificación de la región.

  Es importante evaluar la calidad interna del modelo, a través del cálculo de métricas, para comprobar que el modelo supere los umbrales de referencia establecidos (PCC[31] > 80 e Índice Kappa[32] > 0.75). Para el presente estudio el PCC encontrado fue de 96.24% y el índice Kappa fue de 0.95.

[29] *Script* o archivo de procesamiento por lotes, desarrollado por Carlos Alberto Arnillas en el año 2012. Para efectos de la presente investigación los Scripts utilizados fueron facilitados por uno de los miembros del Centro de Datos para la Conservación-CDC de la Universidad Nacional Agraria la Molina.
[30] R Project for statistical computing: entorno de programa libre de computación para análisis estadístico y gráfico (http://www.r-project.org/).
[31] Porcentaje correctamente clasificado
[32] Índice de Kappa, Este índice relaciona el acuerdo que exhiben los observadores, más allá del debido al azar, con el acuerdo potencial también más allá del azar. (http://dxsp.sergas.es/ApliEdatos/Epidat/Ayuda/5-Ayuda%20Concordancia%20y%20Consistencia.pdf)

Como producto de esta segunda corrida se obtuvieron como productos principales a los siguientes archivos: predicted2.tif y conf.csv (matriz de confusión). El archivo .tif corresponde al raster con los resultados de la clasificación y el archivo con la extensión .csv contiene una matriz de confusión que indica las clases que podrían estarse confundiendo, de ser muy elevada el porcentaje de error observado en esta tabla se debe considerar afinar las áreas de entrenamiento a fin de disminuir el error observado.

- **Revisión de resultados:**

Se procedió a realizar la revisión de los resultados preliminares, con la finalidad de verificar si las áreas de entrenamiento utilizado fueron suficientes, caso contrario se decide a añadir más áreas de entrenamiento o incluso eliminarlas a fin de mejorar los resultados obtenidos, se deberán generar tantas interacciones como sean necesarias hasta encontrar un resultado aceptable. Para el presente estudio se realizaron 2 interacciones, la segunda presentó mejores resultados.

3.5.5 Post-procesamiento

Esta etapa consistió en la transformación de la información generada en raster a formato vectorial (shapefile), a fin de facilitar su manejo y edición, para lo cual se hizo uso del software ArcGis. El post-procesamiento comprende además la generalización, que consistió en

definir la unidad mínima de mapeo a 1 ha, para lo cual se hizo uso de la herramienta Eliminate del ArcGis.

Por otro lado, se procedió a compilar los datos generados a una sola capa, teniendo así la clasificación de coberturas y usos del territorio, la hidrografía y los elementos que fueron enmascarados al inicio del proceso de clasificación (sombras y nubes). Asimismo, se realizó un suavizado de borde con el uso de la herramienta smooth del ArcGis.

También se definió la estructura de la tabla de contenidos de la capa resultante, que quedó definida como se aprecia en la tabla 12.

Tabla 12. Diccionario de datos del shapefile resultante

Campo	Tipo	Longitud	Descripción
Cod_ley	Short Integer	5	Código del tipo de cobertura y/o uso del territorio según leyenda CLC[33]
Leyenda	Texto	50	Denominación del código según leyenda
Nivel_I	Texto	90	Denominación del nivel según leyenda CLC
Nivel_II	Texto	80	Denominación del nivel según leyenda CLC
Nivel_III	Texto	90	Denominación del nivel según leyenda CLC
Ha	Double	--	Área por cada tipo de uso en hectáreas

Fuente: Elaboración propia

[33] Leyenda CORINE Land Cover-CLC, adaptada para Perú (ver tabla 1)

3.5.6 Precisión del mapa

Para determinar el nivel de precisión temática del mapa generado, se consideró la distribución aleatoria de “puntos” a lo largo de toda el área de estudio, estos “puntos” abarcaron la superficie de un pixel (30x30m). El proceso consistió en verificar la clase de cada punto de acuerdo al mapa generado y contrastarlo con las imágenes de alta resolución RapidEye[34], Google Earth y en el caso en que estás imágenes no aportaron mucho al proceso se hizo uso de las mismas imágenes Landsat utilizadas para la clasificación.

- ***Tamaño de la muestra:***

De acuerdo al protocolo de Evaluación de la exactitud temática publicado por el MINAM (2014), el tamaño de la muestra está referido al número de puntos de muestreo que se utilizan para estimar la confiabilidad del mapa. Entre más grande sea el tamaño de la muestra, más precisa será la evaluación; sin embargo por razones de costo y tiempo es conveniente determinar el tamaño de muestras mínimas para alcanzar el objetivo de la evaluación.

Para determinar la cantidad de puntos que fueron usados en este proceso se empleó la fórmula que fue establecida por Cochran, 1977 (citado por MINAM, 2014), dónde se establece que estadísticamente el número de puntos de verificación depende de tres variables:

[34] Imágenes RapidEye que fueron solicitadas a la Dirección General de Ordenamiento Territorial DGOT del Ministerio del Ambiente.

- S : es una constante que depende del nivel de confianza que asignemos.
- p : indica el porcentaje de aciertos estimados (establecido por el área de la clase)
- q : porcentaje de errores estimados
- E : nivel permitido de error

$$N = \frac{S^2 * p * q}{E^2}$$

Asimismo el MINAM (2014) recomienda que, la cantidad de puntos debe ser calculada para cada clase que conforma el mapa, para lo cual se debe tener en cuenta el área de cada clase y los porcentajes que representan del total del área, tomando el valor de “p” en la fórmula antes indicada.

Para calcular la cantidad de puntos de verificación para el presente estudio se tuvo en cuenta los siguientes criterios:

- Rango de confianza (S) de 95%, con un valor de 1.96
- Porcentaje de aciertos (p) que corresponde al porcentaje que representa cada clase.
- Porcentaje de errores estimados (q) de 10%
- Nivel permitido de error (E) de 5%

Aplicando la fórmula para determinar la cantidad de puntos por cada clase se obtuvo los resultados de la siguiente tabla:

Tabla 13. Cantidad de puntos por clase para la verificación del mapa[35]

Cod. de leyenda	Clases	%	N° de puntos/clase (según fórmula)	N° de puntos (redondeando)
1.1	Áreas urbanizadas	0,15	0,23	5
2	Áreas agrícolas	22,33	34,31	35
3.1	Bosques	76,29	117,23	120
3.4.1	Áreas arenosas naturales	0,14	0,22	5
3.4.4	Áreas quemadas	0,21	0,32	5
5.1.1	Ríos	0,88	1,35	5
	Total	**100,00**	**153,66**	**175**

Fuente: Elaboración propia

Como resultado se tuvo que, al considerar esos criterios se deberían de verificar un mínimo de 154 puntos, pero por encontrar decimales se procedió a redondear los valores más bajos, teniendo al final que, para la verificación del mapa se usaron 175 puntos, los cuales fueron distribuidos en todas las clases (tal como se aprecia en la última columna de la tabla 13).

El proceso de verificación del mapa se vio complementado con datos de campo tomados *in situ*. Para la toma de datos en campo se hizo uso de un formato que puede apreciarse en el anexo 1.

[35] Para el proceso de validación no se consideró a la clase de Nubes y sombras, puesto que esta clase no resultó de la propia clasificación, sino que corresponde al proceso de pre-procesamiento de las imágenes donde se obtuvo la máscara para esta clase.

CAPITULO IV: RESULTADOS

4.1 Clasificación de la cobertura y uso del territorio de la provincia de Padre Abad

Mediante el desarrollo de la metodología que plantea el uso del algoritmo Random Forest sobre segmentos (que presentó las métricas de calidad de 96,24% para el porcentaje correctamente clasificado y 0,95 para el índice de Kappa) y el uso de la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Perú[36], se logró la identificación de seis (06) clases de coberturas y usos para el territorio de la provincia de Padre Abad al 2014. Ver clases en las tablas 14 y 15.

Tabla 14. Coberturas y usos del territorio en la provincia de Padre Abad al 2014

Cod. de leyenda	Clases	Superficie (ha)	%
1.1	Áreas urbanizadas	1 311,25	0,14
2	Áreas agrícolas	194 577,81	20,98
3.1	Bosques	664 726,56	71,67
3.4.1	Áreas arenosas naturales (bancos de arena, playas)	1 228,08	0,13
3.4.4	Áreas quemadas	1 825,47	0,20
5.1.1	Ríos	7 678,65	0,83
6	Nubes y sombras	56 081,98	6,05
	Total	**927 429,81**	**100,00**

Fuente: Elaboración propia

[36] Leyenda adaptada por el Ministerio del Ambiente-MINAM (ver tabla 1)

Tabla 15. Coberturas y usos del territorio en los distritos de la provincia de Padre Abad al 2014

Distrito	Cod. de leyenda	Clases	Superficie (ha)
			20 866,86
Alexander Von Humbolt	1,1	Áreas urbanizadas	107,19
	2	Áreas agrícolas	14 910,36
	3,1	Bosques	5 573,44
	3.4.4	Áreas quemadas	275,88
			188 268,42
Curimana	1,1	Áreas urbanizadas	188,30
	2	Áreas agrícolas	36 698,81
	3,1	Bosques	148 475,29
	3.4.1	Áreas arenosas naturales	255,58
	3.4.4	Áreas quemadas	270,47
	5.1.1	Ríos	2 378,89
	6	Nubes y sombras	1,08
			185 733,68
Irazola	1,1	Áreas urbanizadas	129,88
	2	Áreas agrícolas	46 772,25
	3,1	Bosques	137 521,40
	3.4.4	Áreas quemadas	317,95
	5.1.1	Ríos	988,52
	6	Nubes y sombras	3,69
			61 216,86
Neshuya	1,1	Áreas urbanizadas	125,98
	2	Áreas agrícolas	39 030,50
	3,1	Bosques	21 222,72
	3.4.4	Áreas quemadas	837,65
	5.1.1	Ríos	0,00
			471 343,99
Padre Abad	1,1	Áreas urbanizadas	759,90
	2	Áreas agrícolas	57 165,89
	3,1	Bosques	351 933,71
	3.4.1	Áreas arenosas naturales	972,50
	3.4.4	Áreas quemadas	123,53
	5.1.1	Ríos	4 311,24
	6	Nubes y sombras	56 077,21
		Total	**927 429,81**

Fuente: Elaboración propia

De los resultados mostrados en la tabla 14 se puede resaltar que, alrededor del 71% del territorio de la provincia de Padre Abad al 2014 está cubierto por bosques y áreas mayormente naturales (clase con código de leyenda CLC 3.1), y que alrededor del 21% de la superficie de la provincia está ocupada por áreas agrícolas (clase con código de leyenda CLC 2.1), por otro lado la presencia de nubes y sombras en aproximadamente el 6% del total del territorio de la provincia limitó la identificación de alguna clase de cobertura y uso real del territorio en el área de estudio. (Ver figura 23)

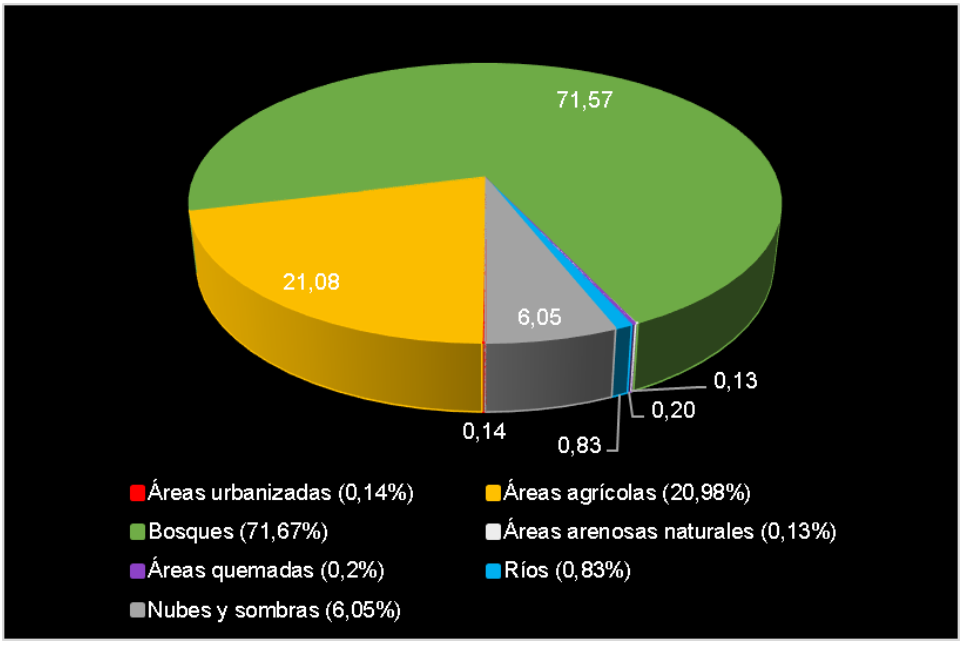


Figura 23. Clases de cobertura y uso del suelo de la provincia de Padre Abad al 2014[37]

A continuación se describen cada una de las clases identificadas:

4.1.1 Áreas artificializadas (Nivel I, código de leyenda 1): Comprende las áreas de las ciudades y las poblaciones, además de aquellas áreas

[37] Fuente: Elaboración propia

periféricas que están siendo incorporadas a las zonas urbanas mediante un proceso gradual de urbanización o de cambio del uso del suelo hacia fines comerciales, industriales, de servicios y recreativos.

4.1.1.1 Áreas urbanizadas (Nivel II, código de leyenda 1.1): Las zonas urbanizadas incluyen los territorios cubiertos por infraestructura urbana y todos aquellos espacios verdes y redes de comunicación asociados con ellas, que configuran un tejido urbano.

En la provincia de Padre Abad esta clase está representada por aproximadamente 1 311 hectáreas (ha), viéndose conformada principalmente por las capitales distritales que abarcan mayor superficie terrestre: Aguaytía (capital del distrito Padre Abad), Alexander Von Humbolt (capital del distrito Alexander Von Humbolt), San Alejandro (capital del distrito Irazola), Monte Alegre (capital del distrito Neshuya), y Curimaná (capital del distrito Curimaná).



Figura 24. Imagen aérea de áreas urbanizadas

4.1.2 Áreas agrícolas (Nivel I, código de leyenda 2): Son los terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos, fibras y otras materias primas industriales, ya sea que se encuentren con cultivos, con pastos, en rotación y en descanso o barbecho. Comprende las áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, áreas de pastos y las zonas agrícolas heterogéneas.

En la provincia de Padre Abad esta clase comprende a cultivos anuales, cultivos permanentes como la palma aceitera y pastos para ganadería. Este tipo de uso comprende alrededor de 194 577 ha (20,98% del territorio provincial).

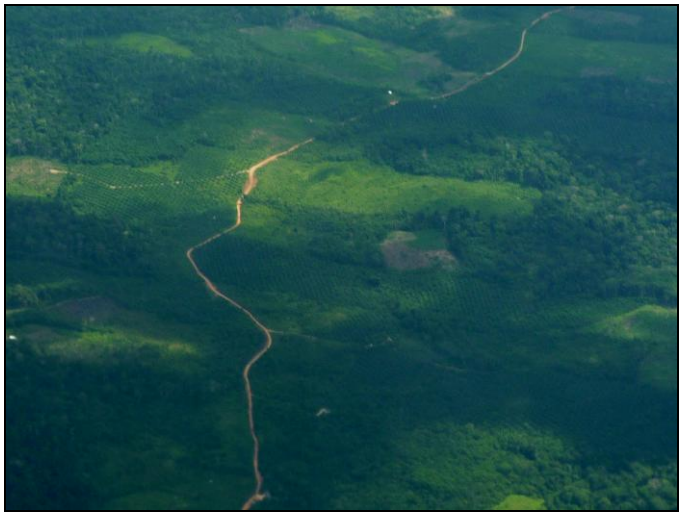


Figura 25. Vista aérea de deforestación por instalación de Palma aceitera



Figura 26. Áreas agrícolas

4.1.3 Bosques y áreas mayormente naturales (Nivel I, código de leyenda 3): Comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo boscoso, arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales que son el resultado de procesos climáticos; también por aquellos territorios constituidos por suelos desnudos y afloramientos rocosos y arenosos, resultantes de la ocurrencia de procesos naturales o inducidos de degradación.

4.1.3.1 Bosques (Nivel II, código de leyenda 3.1): Comprende las áreas constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. De acuerdo con FAO (2001), esta cobertura comprende los bosques naturales y las plantaciones forestales.

En Padre Abad se identificaron 664 726,56 ha (71,67% de la superficie de la provincia).



Figura 27. Vista del dosel superior del bosque

4.1.4 Áreas sin o con poca vegetación (Nivel II, código de leyenda 3.4): Comprende aquellos territorios en los cuales la cobertura vegetal no existe o es escasa, compuesta principalmente por suelos desnudos y quemados, así como por coberturas arenosas y afloramientos rocosos.

4.1.4.1 Áreas arenosas naturales (Nivel III, código de leyenda 3.4.1): Son terrenos bajos y planos constituidos principalmente por suelos arenosos, por lo general desprovistos de vegetación o cubiertos por una vegetación arbustal ralo y bajo. Se encuentran conformando playas de ríos y bancos de arena de los ríos.

Las áreas arenosas identificadas con el estudio comprenden alrededor de 1 228 ha del territorio de la provincia de Padre Abad, todas estas áreas ubicadas en los lechos de los ríos, esta clase es más representativa en época de vaciante, cuando el nivel del río es bajo.



Figura 28. Áreas arenosas naturales

4.1.4.2 Áreas quemadas (Nivel III, código de leyenda 3.4.4): Comprende las zonas afectadas por quemas recientes, donde los materiales carbonizados todavía están presentes. Las áreas quemadas forman parte de una práctica “común” como parte del proceso de preparación de tierras para cultivos, o en el caso de áreas con pastos.

Con el estudio se identificaron alrededor de 1 825 ha en la provincia de Padre Abad.



Figura 29. Áreas quemadas como parte de la preparación de terrenos para la instalación de cultivos

4.1.5 Superficies de agua (Nivel I, código de leyenda 5): Son los cuerpos y cauces de aguas permanentes, intermitentes y estacionales, localizados en el interior del continente. Se clasifican en:

4.1.5.1 Aguas continentales (Nivel II, código de leyenda 5.1): Son cuerpos de aguas permanentes, intermitentes y estacionales que comprenden lagos, lagunas, ciénagas, depósitos y estanques naturales o artificiales de agua dulce (no salina), embalses y cuerpos de agua en movimiento, como los ríos y canales.

4.1.5.1.1 Ríos (Nivel III, código de leyenda 5.1.1): Un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, en un lago o en otro río.

Para el presente estudio se consideró como unidad mínima cartografiable aquellos ríos que presentaron un ancho del cauce mayor o igual a un pixel equivalente a 30 metros. Con el estudio se logró identificar aproximadamente 7 678 ha de superficies de agua para la provincia de Padre Abad.



Figura 30. Río Aguaytía

4.1.6 Nubes y sombras (Nivel I, código de leyenda 6): La presencia de nubes y sombras en insumos como las imágenes de satélites limitan la identificación de las verdaderas coberturas y usos de la tierra sobre la cual se encuentran, es por ello que en muchos casos la excesiva presencia de esta clase imposibilita el desarrollo de este tipo de trabajos.

Para el presente estudio este tipo de cobertura se encontró en el 6% del total del área estudio.



Figura 31. Nubes y sombras

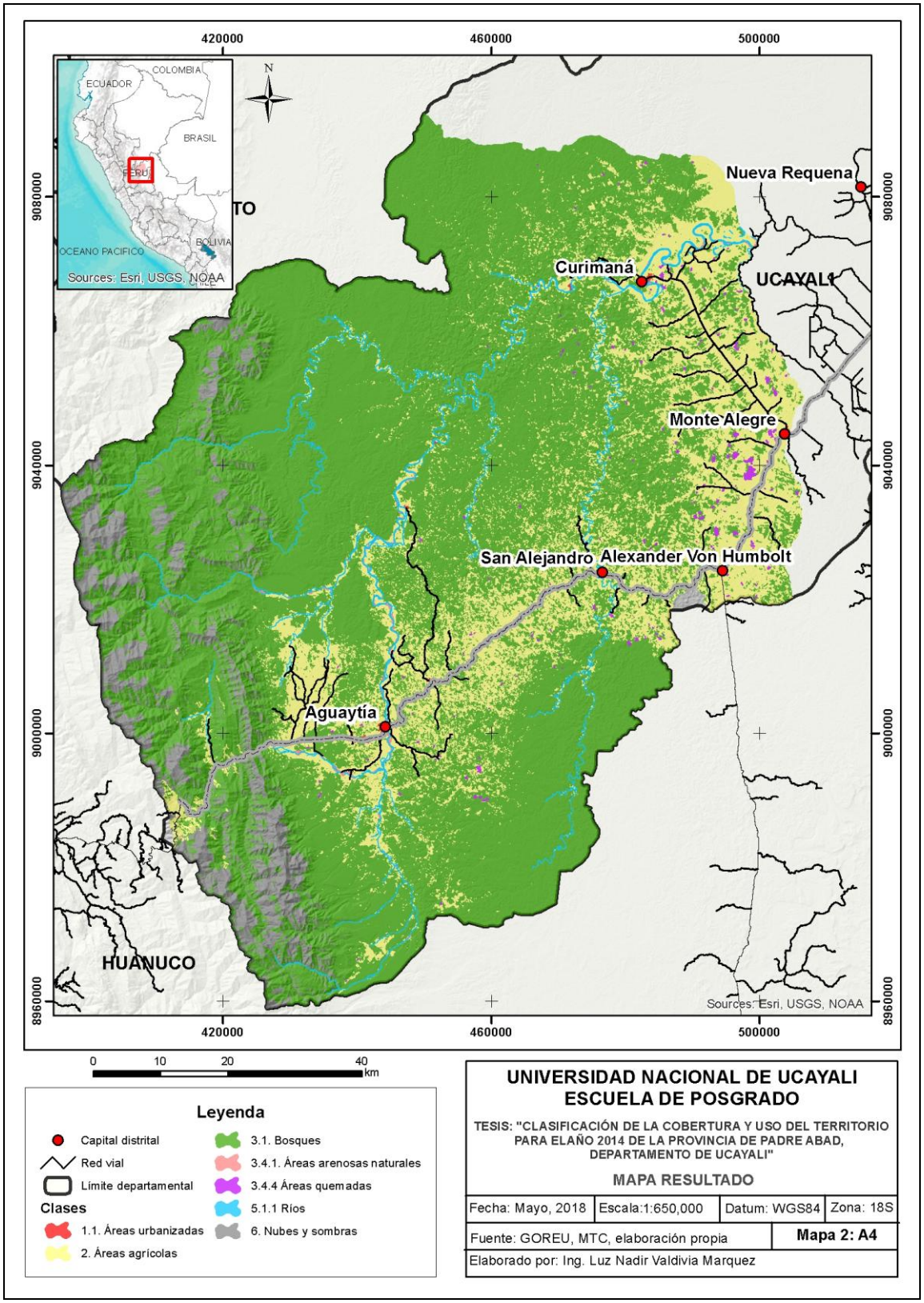


Figura 32. Mapa de cobertura y uso del territorio de la provincia de Padre Abad[38]

[38] Elaboración propia. Este mapa también puede apreciarse en el Anexo 4.

4.2 Clasificación de la cobertura en los diferentes tipos de usos asignados y de acuerdo a la capacidad de uso mayor en la provincia de Padre Abad

Las diferentes categorías de tenencia sobre el territorio definen los derechos y obligaciones asignados sobre el mismo, en la provincia de Padre Abad se identificaron diversos tipos de categorías asignadas sobre el territorio, teniendo entre ellos a la de conservación con el 7,9% del territorio asignado al Parque Nacional Cordillera Azul; 10,7% perteneciente a territorio de Comunidades Nativas; 7,3% a predios rurales; 2% a Concesiones forestales maderables; 0,05% a Concesiones de conservación; 26,7% considerado como bosque de producción permanente, 30% sin uso definido y 15% presenta algún tipo de superposición de derechos. Las clases identificadas con el presente estudio por cada tipo de uso asignado pueden apreciarse en la tabla 16.

Por otro lado, la capacidad de uso mayor de la tierra brinda información sobre las potencialidades de un lugar determinado en cuanto al desarrollo de actividades productivas. En ese sentido, para la provincia de Padre Abad se realizó el cruce de la información del mapa de Capacidad de uso mayor obtenido por la ONERN (1981), con los resultados obtenidos con el presente estudio, los resultados son presentados en la tabla 17.

Tabla 16. Clasificación de cobertura y uso encontrada en los diferentes tipos de categoría de tenencia de la tierra en la provincia de Padre Abad

Categoría de uso y tipo de tenencia	Código de leyenda	Clase	Superficie (ha)
Parque Nacional Cordillera Azul	2	Áreas agrícolas	6,12
	3,1	Bosques	56 060,63
	5.1.1	Ríos	250,48
	6	Nubes y sombras	17 392,58
Comunidades Nativas	1,1	Áreas urbanizadas	36,97
	2	Áreas agrícolas	8 758,15
	3,1	Bosques	86 922,83
	3.4.1	Áreas arenosas naturales	316,49
	3.4.4	Áreas quemadas	63,51
	5.1.1	Ríos	1 496,78
	6	Nubes y sombras	1 902,59
Predios rurales	1,1	Áreas urbanizadas	90,31
	2	Áreas agrícolas	39 421,62
	3,1	Bosques	27 677,30
	3.4.1	Áreas arenosas naturales	5,02
	3.4.4	Áreas quemadas	597,48
	5.1.1	Ríos	35,34
	6	Nubes y sombras	103,86
Concesiones maderables-VIG	2	Áreas agrícolas	2 242,71
	3,1	Bosques	17 169,66
	5.1.1	Ríos	21,43
Concesiones de conservación-VIG	2	Áreas agrícolas	27,68
	3,1	Bosques	479,38
Bosque de producción permanente	1,1	Áreas urbanizadas	5,57
	2	Áreas agrícolas	31 829,05
	3,1	Bosques	205 069,31
	3.4.1	Áreas arenosas naturales	205,31
	3.4.4	Áreas quemadas	179,53
	5.1.1	Ríos	1 850,23
	6	Nubes y sombras	8 460,16
Uso no definido	1,1	Áreas urbanizadas	1 178,40
	2	Áreas agrícolas	103 705,85
	3,1	Bosques	140 865,62
	3.4.1	Áreas arenosas naturales	698,86
	3.4.4	Áreas quemadas	894,10
	5.1.1	Ríos	3 562,58
	6	Nubes y sombras	28 222,80
Área de superposición entre categorías de uso	2	Áreas agrícolas	8 586,62
	3,1	Bosques	130 481,83
	3.4.1	Áreas arenosas naturales	2,40
	3.4.4	Áreas quemadas	90,85
	5.1.1	Ríos	461,81
Total en la provincia de Padre Abad			**927 429,81**

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Clasificación de cobertura y uso encontrada de acuerdo a la capacidad de uso mayor de la tierra de la provincia de Padre Abad

Capacidad de uso mayor	Código de leyenda	Clases	Superficie (ha)
Tierra apta para cultivo en limpio	1,1	Áreas urbanizadas	218,32
	2	Áreas agrícolas	17 210,48
	3,1	Bosques	25 765,77
	3.4.1	Áreas arenosas naturales	609,24
	3.4.4	Áreas quemadas	123,39
	5.1.1	Ríos	3 005,85
Tierra apta para pastos	1,1	Áreas urbanizadas	252,56
	2	Áreas agrícolas	89 901,56
	3,1	Bosques	154 320,05
	3.4.4	Áreas quemadas	1 270,24
	5.1.1	Ríos	488,74
Tierra apta para producción forestal	1,1	Áreas urbanizadas	829,28
	2	Áreas agrícolas	81 776,67
	3,1	Bosques	327 300,59
	3.4.1	Áreas arenosas naturales	594,99
	3.4.4	Áreas quemadas	412,57
	5.1.1	Ríos	3 380,88
	6	Nubes y sombras	285,72
Tierra de protección	1,1	Áreas urbanizadas	11,08
	2	Áreas agrícolas	5 689,11
	3,1	Bosques	157 340,16
	3.4.1	Áreas arenosas naturales	23,86
	3.4.4	Áreas quemadas	19,27
	5.1.1	Ríos	803,19
	6	Nubes y sombras	55 796,26
Total en la provincia de Padre Abad			**927 429,81**

Fuente: Elaboración propia

4.3 Verificación de resultados

Para estimar el nivel de precisión del mapa obtenido con el estudio se realizó el proceso de verificación, para lo cual se determinó que la cantidad de puntos (muestra) a usarse en la verificación serían 175 puntos, los mismos que fueron distribuidos aleatoriamente en todo el territorio de estudio (provincia de Padre Abad) por cada clase identificada. Para este proceso no se consideró la clase de nubes y sombras. Ver tabla 18.

Tabla 18. Cantidad de puntos usados para la verificación de resultados

Cod. de leyenda	Clases	N° de puntos
1.1	Áreas urbanizadas	5
2	Áreas agrícolas	35
3.1	Bosques	120
3.4.1	Áreas arenosas naturales	5
3.4.4	Áreas quemadas	5
5.1.1	Ríos	5
	Total	**175**

Fuente: Elaboración propia

La verificación de resultados consistió en revisar cada punto con la ayuda de las imágenes de alta resolución RapidEye y atribuirle la clase que le correspondía y luego comparar con los resultados obtenidos con la clasificación dada por el presente estudio. Por otro lado, también se hizo uso de 19 puntos verificados en campo (Ver listado de puntos en el anexo 2). Este proceso permitió obtener una matriz de error (ver tabla 19) y analizar los datos en función a los errores de comisión y omisión encontrados.

Tabla 19. Matriz de error

		Referencia						Total	Proporción	Áreas del mapa (ha)
		11	**2**	**31**	**341**	**344**	**511**			
Mapa	**11**	5	-	-	-	-	-	***5***	0,002	1 311,248
	2	-	31	4	-	-	-	***35***	0,223	194 577,814
	31	-	2	118	-	-	-	***120***	0,763	664 726,562
	341	-	-	-	5	-	-	***5***	0,001	1 228,084
	344	-	1	-	-	4	-	***5***	0,002	1 825,471
	511	-	-	-	-	-	5	***5***	0,009	7 678,654
Total		***5***	***34***	***122***	***5***	***4***	***5***	***175***	***1,000***	***871 347,833***

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la matriz de error se procedió a determinar las nuevas proporciones de las áreas para cada clase identificada (ver tabla 20), este proceso es realizado con la finalidad de poder realizar una estimación en la superficie que podría tener cada clase identificada (superficie corregida), así

como el intervalo de confianza en hectáreas, además de la precisión del usuario que indica el valor correctamente clasificado de una clase respecto al total dado como dicha clase y la precisión del productor, que indica en qué medida ha sido bien clasificada una clase dada (ver tabla 21).

Tabla 20. Proporciones de áreas por clases

		Referencia						Total
		11	**2**	**31**	**341**	**344**	**511**	
Mapa	**11**	0,002	-	-	-	-	-	***0,002***
	2	-	0,199	0,026	-	-	-	***0,224***
	31	-	0,013	0,749	-	-	-	***0,762***
	341	-	-	-	0,001	-	-	***0,001***
	344	-	0,000	-	-	0,002	-	***0,002***
	511	-	-	-	-	-	0,009	***0,009***
Total		***0,002***	***0,212***	***0,775***	***0,001***	***0,002***	***0,009***	***1,000***

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Superficie y precisión por clase

	Clases-código de leyenda					
	11	**2**	**31**	**341**	**344**	**511**
Estimación de superficie (ha)	1 311,248	183 784,220	675 885,250	1 228,084	1 460,377	7 678,654
Intervalo de confianza de las superficies estimadas (ha)	0	25 832,267	25 822,354	0	715,585	0
Precisión del usuario	100%	89%	98%	100%	80%	100%
Precisión del productor	100%	94%	97%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se logró determinar que la precisión general del mapa es de **96%**, resultado de la división de todos los aciertos (168) entre el número total de puntos evaluados (175). Y una precisión promedio del usuario de 94% y una precisión promedio del productor de 98%,

CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Existen diversas metodologías y clasificadores basados en algoritmos para realizar la clasificación de coberturas vegetales y usos del territorio, el presente estudio tuvo como área de análisis la provincia de Padre Abad del departamento de Ucayali, para lo cual se tuvo como insumo una escena capturada por el satélite Landsat 8 sensor OLI, a la cual se aplicó el proceso de segmentación y se usó el Random Forest como algoritmo clasificador. El uso de este protocolo dio como resultados las siguientes métricas de calidad: Porcentaje correctamente clasificado (PCC) de 96,24% y un índice de Kappa de 0,95. Un estudio similar realizado en el marco del proyecto “Análisis de las dinámicas de cambio de cobertura de la tierra en la Comunidad Andina” desarrollado por Arnillas, *et al.* 2012 llegaron a la conclusión de que el método del Random Forest sobre segmentos fue el que presentó mejores resultados logrando obtener como PCC 86,7% y como índice de Kappa 0,8.

De la comparación de las métricas de calidad obtenidos con el presente estudio y los obtenidos por Arnillas, *et al.* 2012 se puede indicar que, en términos de métricas de calidad el presente estudio encontró mejores resultados.

El Ministerio del Ambiente a través de la Dirección General de Evaluación y Financiamiento del Patrimonio Natural elaboró el mapa de cobertura vegetal del Perú al 2015, para lo cual usaron como metodología el análisis visual de imágenes satelitales Landsat 8OLI del año 2015, obteniendo los siguientes resultados para la provincia de Padre Abad: 656 748,33 ha de bosque; 607,18 ha de vegetación de isla; 628,95 ha de aguajales; 11 599,84 ha de ríos y 257 845,50 ha de no bosque.

Otra iniciativa del Ministerio del Ambiente por generar información cartográfica valiosa del territorio nacional es el reciente mapeo de bosque y pérdida de bosque de la Amazonía peruana realizado en convenio con la Universidad de Maryland en el marco de REDD+ Nacional, la metodología consiste en el uso de imágenes Landsat 7ETM+ y la aplicación de clasificación supervisada con el empleo de un algoritmo basado en “árbol de decisiones” (desarrollado por la Universidad de Maryland), además que lograron generar mosaicos libres de nubes mediante la selección de pixeles limpios, los resultados para la provincia de Padre Abad al 2014 fueron: 670 888,59 ha de bosque; 17 527,82 ha de ríos y 239 013,40 ha de no bosque.

Con el presente estudio se analizaron imágenes Landsat 8OLI del 2014 y se empleó una clasificación supervisada basada en el uso del algoritmo random forest sobre segmentos que permitió la obtención de los siguientes resultados para la provincia de Padre Abad: 664 726,56 ha de bosque; 7 678,7 ha de ríos, 198 942,62 ha de no bosque y 56 137,3 ha de no data (nubes y sombras), este último dato es parte de la incertidumbre en los datos encontrados ya que no se puede especificar que categorías estaría abarcando esta clase.

Las dos experiencias citadas utilizaron metodologías diferentes a la desarrollada en la presente investigación, sin embargo, los resultados encontrados por los tres estudios muestran congruencia en cuanto a la superficie encontrada para cada clase identificada, teniendo así que, la cobertura de bosque ha venido menguando en tanto que la cobertura de no bosque se va incrementando a lo largo del tiempo como producto de la conversión de tierras forestales a otro tipo de usos.

CONCLUSIONES

- El uso de la teledetección y los sistemas de información geográfica permiten generar información valiosa sobre la cobertura vegetal y los usos del territorio para una determinada fecha y zona, así como realizar monitoreos periódicos sobre los mismos.

- Mediante el desarrollo de la metodología Random Forest sobre segmentos y el uso de la leyenda CORINE Land Cover (adaptada para el Perú), la presente investigación logró identificar seis clases de cobertura vegetal y usos del territorio en la provincia de Padre Abad entre ellas: áreas urbanizadas, áreas agrícolas, bosques, áreas arenosas naturales, áreas quemadas y ríos, además de la clase de nubes y sombras.

- Los mapas obtenidos mediante el uso de la teledetección y los SIG deben ser verificados a fin de estimar su nivel de precisión. Para la presente investigación, el mapa resultado obtuvo una precisión promedio del usuario de 94% y una precisión promedio del productor de 98%, y una confiabilidad total del mapa de 96%.

- Del análisis realizado para determinar los tipos de cobertura vegetal en las categorías de tenencia de la tierra se determinó que, la categoría en la que se presenta una mayor extensión de no bosque es en las tierras que no pertenecen a una categoría de uso definido, representando el 53,52% del no bosque identificado en la provincia de Padre Abad, seguido de los

predios rurales que presentan el 20% del no bosque y el 16% en la categoría definida como bosques de producción permanente.

- Al realizar la comparación de los resultados obtenidos con el presente estudio con el mapa de Capacidad de uso mayor de las tierras se concluye que, al desarrollar actividades productivas no se tiene en cuenta la capacidad productiva de la tierra, sino más bien un criterio de proximidad a las vías de accesos (vía fluvial o terrestre), probablemente justificado en que ello permite el transporte de los productos a los diversos mercados.

SUGERENCIAS

- Teniendo en cuenta que las actividades antrópicas son dinámicas y que además son las principales responsables de los cambios en la cobertura y uso del territorio, se debe considerar el monitoreo periódico, a fin de contar con información actualizada y de poder medir los cambios, así como sus posibles impactos.

- Los resultados encontrados corresponden al 2014 y al uso de la metodología de Random Forest sobre segmentos, por lo cual se recomienda que, al realizar una comparación de los resultados obtenidos con los de otros estudios similares se tenga en cuenta el proceso metodológico empleado.

- Los mapas resultados son aproximaciones de la realidad que cuentan con un nivel de precisión, que debe considerarse al momento de realizar comparaciones con datos tomados *in situ*.

- El proceso de verificación de los mapas podría prescindir de salidas al campo, siempre que se disponga de imágenes de alta resolución de fechas próximas a la del análisis realizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Arnillas, C.A; Barrena, V; Llactayo, W; Ortíz, H; Regal, F; Bubín de Celis, E; Vásquez, P; Drenkhan, F; Llerena, C.E; Eespino, P; García, V; Gonzáles-Zúñiga, S; Gushiken, E; López, V. y Vásquez, R. (2012). *Informe Final del Proyecto: Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en la Comunidad Andina. Componente Nacional Perú – Primera Etapa*. Centro de Datos para la Conservación (CDC-UNALM). Laboratorio de Teledetección (LTAUNALM). Dirección General de Ordenamiento Territorial - Ministerio del Ambiente (DGOT - MINAM). Fundación para el Desarrollo Agrario (FDA). Lima -Perú. 56 p.

2. Ariza. A. (2013). *Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM*. Bogotá-Colombia. 46 p.

3. Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de la teledetección espacial*. España. 450p.

4. Estación espacial Europea-ESA. (2014). *Elementos de la teledetección*. Consultado 27 de mayo 2017. Recuperado de http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_0.html

5. Fondo del Ambiente-FONAM. (2006). *Propuesta final para una definición peruana de bosques a ser utilizada en proyectos de uso de la tierra, cambio de uso y silvicultura bajo el protocolo de Kyoto*. Consultado 02 de marzo de 2017. Recuperado de

http://www.fonamperu.org/general/bosques/documentos/propuesta_final.pd

6. Gonzaga. C. (2014). *"Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador"*. Tesis para optar al grado de Magíster en Geomática. La Plata-Argentina. 108 p.

7. Instituto Geográfico Nacional de España. (2014). *Proyecto CORINE Land Cover*. Consultado 27 de mayo de 2017. Recuperado de http://www.ign.es/ign/layoutIn/corineLandCover.do

8. Lucioni, N. (2007). *Sistemas de información geográfica y teledetección*. Consultado, 26 de mayo de 2017. Recuperado de http://www.filo.uba.ar/contenidos/secretarias/seube/ revistaespacios/ PDF/ 35.1-Sistemas.pdf.

9. Ministerio del Ambiente. (2014). *Protocolo: Evaluación de la exactitud temática del mapa de deforestación*. Dirección General de Ordenamiento Territorial. Lima. 32 p.

10. Ministerio del Ambiente. (2012). *Memoria descriptiva del mapa de cobertura vegetal del Perú al 2009*. Dirección General de Evaluación y Financiamiento del Patrimonio Natural. Lima. 76 p.

11. NASA. (2013). Consultado 02 de marzo de 2017. Recuperado de http://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/main/

12. Pagot, M. (2003). *Metodologías Inductivas y Deductivas en técnicas de Teledetección*. Consultado 03 de abril de 2017. Recuperado de http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/estruct/lgodoy/Problemas%20Conocimiento/8_Pagot.pdf

13. Pérez, M. (2001). *Aplicaciones de la Teledetección y SIG en la caracterización de Humedales en la Reserva de la Biósfera de la Mancha Húmeda*. Tesis de máster. Consultado 03 abril de 2017. Recuperado de http://eprints.ucm.es/13964/2/TFM_Maria_Perez.pdf

14. Pinilla, C. (1995). *Elementos de Teledetección. Ra-Ma*. Madrid. Consultado 27 de mayo de 2017. Recuperado de http://coello.ujaen.es/asignaturas/teledeteccion/lateledeteccion.htm.

15. Sistema de Información Ambiental de Colombia-SIAC. (2014). *Metodología CORINE Land Cover*. Consultado 27 de mayo de 2017. Recuperado de https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=471&conID=647

Correo electrónico del autor: luznavaldivia@gmail.com

ANEXOS

Anexo 1. Ficha utilizada para la toma de datos de verificación

Responsable			**Fecha**	
Coordenadas (UTM)	**Punto N°……..**	X :	**Datum**	WGS84
		Y :	**Zona UTM**	18S
Altura (m.s.n.m.)		Z :	**Hora**	
Departamento			**Provincia**	
Lugar de referencia			**Distrito**	
Bosque / no bosque (agricultura, áreas urbanas, etc.)	…… ……			
Observaciones (Fisonomía, vegetación predominante, actividad humana)				
…… …… …… ……				
Fotografía /Numeración/Código				
N: …… E: …… S: …… O: ……				

Anexo 2. Puntos usados para la verificación de resultados

N° punto	Tipo de verificación	Este	Norte	Código de mapa	Código campo	Código imagen
1	Campo	470081	9014558	2	2	------
2	Campo	468109	9017045	2	2	------
3	Campo	481445	9017228	2	2	------
4	Campo	475883	9021184	31	31	------
5	Campo	488413	9035763	2	2	------
6	Campo	502934	9048380	31	31	------
7	Campo	470568	9028976	2	2	------
8	Campo	469425	9029099	31	31	------
9	Campo	469818	9029444	2	2	------
10	Campo	470935	9029518	2	2	------
11	Campo	488945	9039000	2	2	------
12	Campo	469706	9028685	2	2	------
13	Campo	490546	9053031	31	31	------
14	Campo	497877	9044700	2	2	------
15	Campo	489649	9044724	2	2	------
16	Campo	489544	9044732	2	2	------
17	Campo	489368	9045125	2	2	------
18	Campo	490349	9053093	2	2	------
19	Campo	490603	9053148	31	2	------
20	Imágenes satelitales	476645	9023998	11	------	11

N° punto	Tipo de verificación	Este	Norte	Código de mapa	Código campo	Código imagen
21	Imágenes satelitales	503950	9045429	11	------	11
22	Imágenes satelitales	439032	8999658	11	------	11
23	Imágenes satelitales	439231	8999071	11	------	11
24	Imágenes satelitales	441279	8999099	11	------	11
25	Imágenes satelitales	471292	9022379	2	------	2
26	Imágenes satelitales	427101	8999447	2	------	31
27	Imágenes satelitales	483102	9056617	2	------	2
28	Imágenes satelitales	500678	9049746	2	------	2
29	Imágenes satelitales	441001	8997190	2	------	31
30	Imágenes satelitales	474192	9034202	2	------	2
31	Imágenes satelitales	493322	9035570	2	------	2
32	Imágenes satelitales	434818	9010439	2	------	2
33	Imágenes satelitales	488938	9038847	2	------	31
34	Imágenes satelitales	462945	9015137	2	------	2
35	Imágenes satelitales	493810	9026607	2	------	2
36	Imágenes satelitales	485734	9025356	2	------	2
37	Imágenes satelitales	444279	9054376	2	------	2
38	Imágenes satelitales	437123	9022852	2	------	2
39	Imágenes satelitales	470286	9033989	2	------	2
40	Imágenes satelitales	495184	9046129	2	------	2
41	Imágenes satelitales	456824	9001422	2	------	2

N° punto	Tipo de verificación	Este	Norte	Código de mapa	Código campo	Código imagen
42	Imágenes satelitales	489314	9073616	2	------	31
43	Imágenes satelitales	498734	9058413	2	------	2
44	Imágenes satelitales	479301	9064122	2	------	2
45	Imágenes satelitales	493618	9039502	2	------	2
46	Imágenes satelitales	455320	8976574	31	------	31
47	Imágenes satelitales	412271	9044803	31	------	31
48	Imágenes satelitales	473745	9001685	31	------	31
49	Imágenes satelitales	480585	9024051	31	------	31
50	Imágenes satelitales	427454	8966991	31	------	31
51	Imágenes satelitales	423030	9038800	31	------	31
52	Imágenes satelitales	421382	9038678	31	------	31
53	Imágenes satelitales	446019	8989842	31	------	31
54	Imágenes satelitales	486650	9065846	31	------	31
55	Imágenes satelitales	469089	8977339	31	------	31
56	Imágenes satelitales	464129	9079159	31	------	31
57	Imágenes satelitales	466133	8999775	31	------	31
58	Imágenes satelitales	413791	8991976	31	------	31
59	Imágenes satelitales	464981	8986710	31	------	31
60	Imágenes satelitales	422474	8975106	31	------	31
61	Imágenes satelitales	467066	9032238	31	------	31
62	Imágenes satelitales	453271	8982371	31	------	31
63	Imágenes satelitales	470921	8984779	31	------	31

N° punto	Tipo de verificación	Este	Norte	Código de mapa	Código campo	Código imagen
64	Imágenes satelitales	424410	8983082	31	------	31
65	Imágenes satelitales	430278	8991892	31	------	31
66	Imágenes satelitales	415345	9037531	31	------	31
67	Imágenes satelitales	429234	9021983	31	------	31
68	Imágenes satelitales	479962	9047515	31	------	31
69	Imágenes satelitales	445068	9034776	31	------	31
70	Imágenes satelitales	467002	8994313	31	------	31
71	Imágenes satelitales	453650	9068725	31	------	31
72	Imágenes satelitales	410737	9014379	31	------	31
73	Imágenes satelitales	470491	9084285	31	------	31
74	Imágenes satelitales	454790	9046173	31	------	31
75	Imágenes satelitales	442298	9005144	31	------	2
76	Imágenes satelitales	470083	9002257	31	------	31
77	Imágenes satelitales	469244	8984371	31	------	31
78	Imágenes satelitales	413850	9028988	31	------	31
79	Imágenes satelitales	455409	9043547	31	------	31
80	Imágenes satelitales	464772	9061215	31	------	31
81	Imágenes satelitales	486230	9034954	31	------	31
82	Imágenes satelitales	409766	9020196	31	------	31
83	Imágenes satelitales	481051	9009933	31	------	31
84	Imágenes satelitales	429017	8989705	31	------	31
85	Imágenes satelitales	459270	9036287	31	------	31

N° punto	Tipo de verificación	Este	Norte	Código de mapa	Código campo	Código imagen
86	Imágenes satelitales	460880	9049354	31	------	31
87	Imágenes satelitales	469495	9074668	31	------	31
88	Imágenes satelitales	429271	8987358	31	------	31
89	Imágenes satelitales	468675	8989419	31	------	31
90	Imágenes satelitales	449147	9062100	31	------	31
91	Imágenes satelitales	468781	9013402	31	------	31
92	Imágenes satelitales	480726	9000802	31	------	31
93	Imágenes satelitales	449849	9021580	31	------	31
94	Imágenes satelitales	417297	9019046	31	------	31
95	Imágenes satelitales	435292	9038951	31	------	31
96	Imágenes satelitales	502929	9026482	31	------	31
97	Imágenes satelitales	427963	8997123	31	------	31
98	Imágenes satelitales	437263	9035597	31	------	31
99	Imágenes satelitales	396894	9037350	31	------	31
100	Imágenes satelitales	442376	8985633	31	------	31
101	Imágenes satelitales	469839	8996524	31	------	31
102	Imágenes satelitales	462174	9051440	31	------	31
103	Imágenes satelitales	447466	9081991	31	------	31
104	Imágenes satelitales	441508	9066485	31	------	31
105	Imágenes satelitales	475652	9042433	31	------	31
106	Imágenes satelitales	412460	8999991	31	------	31

N° punto	Tipo de verificación	Este	Norte	Código de mapa	Código campo	Código imagen
107	Imágenes satelitales	432779	9052361	31	------	31
108	Imágenes satelitales	445381	8972186	31	------	31
109	Imágenes satelitales	408685	9034247	31	------	31
110	Imágenes satelitales	476078	9069016	31	------	31
111	Imágenes satelitales	414400	9046327	31	------	31
112	Imágenes satelitales	433188	9064778	31	------	31
113	Imágenes satelitales	407062	9037642	31	------	31
114	Imágenes satelitales	459589	8985378	31	------	31
115	Imágenes satelitales	443069	9011704	31	------	31
116	Imágenes satelitales	495151	9048578	31	------	31
117	Imágenes satelitales	455037	9069663	31	------	31
118	Imágenes satelitales	424520	9016979	31	------	31
119	Imágenes satelitales	446807	8980781	31	------	31
120	Imágenes satelitales	440300	9037348	31	------	31
121	Imágenes satelitales	452023	9059361	31	------	31
122	Imágenes satelitales	428239	9065874	31	------	31
123	Imágenes satelitales	408479	9020181	31	------	31
124	Imágenes satelitales	437079	8988994	31	------	31
125	Imágenes satelitales	459326	9058924	31	------	31
126	Imágenes satelitales	492703	9067750	31	------	31
127	Imágenes satelitales	437517	8964980	31	------	31

N° punto	Tipo de verificación	Este	Norte	Código de mapa	Código campo	Código imagen
128	Imágenes satelitales	409195	9038239	31	------	31
129	Imágenes satelitales	470162	9010115	31	------	31
130	Imágenes satelitales	450421	9044980	31	------	31
131	Imágenes satelitales	433451	8991771	31	------	31
132	Imágenes satelitales	464173	9010163	31	------	31
133	Imágenes satelitales	427811	9013000	31	------	31
134	Imágenes satelitales	466989	8982868	31	------	31
135	Imágenes satelitales	444879	9037458	31	------	31
136	Imágenes satelitales	426760	9049016	31	------	31
137	Imágenes satelitales	446702	8976172	31	------	31
138	Imágenes satelitales	425273	9065300	31	------	31
139	Imágenes satelitales	457408	8981819	31	------	31
140	Imágenes satelitales	408805	9006017	31	------	31
141	Imágenes satelitales	412334	9021152	31	------	31
142	Imágenes satelitales	432827	8990172	31	------	31
143	Imágenes satelitales	437841	9040614	31	------	31
144	Imágenes satelitales	500367	9041819	31	------	31
145	Imágenes satelitales	481736	9028244	31	------	31
146	Imágenes satelitales	447184	8966262	31	------	31
147	Imágenes satelitales	415940	8992792	31	------	31
148	Imágenes satelitales	478700	9034489	31	------	31
149	Imágenes satelitales	487115	9038044	31	------	31

° punto	Tipo de verificación	Este	Norte	Código de mapa	Código campo	Código imagen
150	Imágenes satelitales	459112	9063239	31	------	31
151	Imágenes satelitales	441604	9050107	31	------	31
152	Imágenes satelitales	442231	9042070	31	------	31
153	Imágenes satelitales	444212	9062384	31	------	31
154	Imágenes satelitales	439677	9018441	31	------	31
155	Imágenes satelitales	466109	8975023	31	------	31
156	Imágenes satelitales	440868	9015980	31	------	31
157	Imágenes satelitales	460156	9084957	31	------	31
158	Imágenes satelitales	476825	9087418	31	------	31
159	Imágenes satelitales	459442	8972324	31	------	31
160	Imágenes satelitales	408007	9043127	31	------	31
161	Imágenes satelitales	477467	9052693	511	------	511
162	Imágenes satelitales	477944	9067660	511	------	511
163	Imágenes satelitales	445450	8989000	511	------	511
164	Imágenes satelitales	433853	9018203	511	------	511
165	Imágenes satelitales	452723	9043258	511	------	511
166	Imágenes satelitales	441568	9024259	341	------	341
167	Imágenes satelitales	485633	9070248	341	------	341
168	Imágenes satelitales	445042	8996747	341	------	341
169	Imágenes satelitales	445159	9011699	341	------	341
170	Imágenes satelitales	497950	9073319	341	------	341
171	Imágenes satelitales	459272	8990080	344	------	344

N° punto	Tipo de verificación	Este	Norte	Código de mapa	Código campo	Código imagen
172	Imágenes satelitales	494798	9033091	344	------	344
173	Imágenes satelitales	485527	9045441	344	------	2
174	Imágenes satelitales	498751	9033943	344	------	344
175	Imágenes satelitales	470246	9011654	344	------	344

Anexo 3. Fotos de campo

- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 1







- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 2





- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 3









- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 4






- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 5






- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 6




- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 7






- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 8




- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 9




- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 10






- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 11






- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 12




- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 13






- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 14





- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 15





- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 16






- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 17






- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 18






- Fotografías tomadas para el punto de verificación N° 19







Anexo 4. MAPA DE CLASIFICACIÓN