

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**CAMBIOS DE LAS COBERTURAS Y USOS DEL SUELO  
EN LA MICROCUENCA DEL RÍO JUCUSBAMBA,  
AMAZONAS (PERÚ), 1992-2052**

**Autor: Bach. Rodrigo Cachay Reynaga**

**Asesores: Mg. Nilton Beltrán Rojas Briceno**

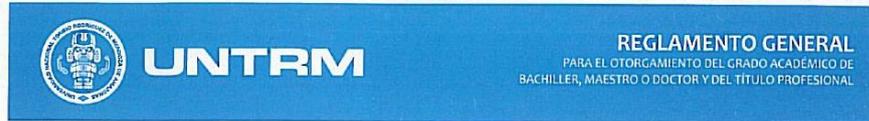
**Ing. Rolando Salas López**

Registro:

**CHACHAPOYAS - PERÚ**

**2023**

# AUTORIZACIÓN DE PUBLICATION DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM



## ANEXO 3-H

### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM

- Datos de autor 1**  
Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes): Cachay Reynaga Rodrigo  
DNI N°: 76862616  
Correo electrónico: 7686261652@untrm.edu.pe  
Facultad: Ingeniería Civil y Ambiental  
Escuela Profesional: Ingeniería Ambiental  
**Datos de autor 2**  
Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes): \_\_\_\_\_  
DNI N°: \_\_\_\_\_  
Correo electrónico: \_\_\_\_\_  
Facultad: \_\_\_\_\_  
Escuela Profesional: \_\_\_\_\_
- Título de la tesis para obtener el Título Profesional**  
CAMBIOS DE LOS COBERTURAS Y USOS DEL SUELO EN LA MICROZONA DEL RIO JULCUBARRA, AMAZONAS (PERÚ), 1992-2052
- Datos de asesor 1**  
Apellidos y nombres: Salas Lopez Rolando  
DNI, Pasaporte, C.E N°: 47670695  
Open Research and Contributor-ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9670-0970>) <https://orcid.org/0000-0003-2184-6761>
- Datos de asesor 2**  
Apellidos y nombres: Rojas Briceño Milton Beltrán  
DNI, Pasaporte, C.E N°: 72648444  
Open Research and Contributor-ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9670-0970>) <https://orcid.org/0000-0002-5352-6140>
- Campo del conocimiento según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos- OCDE (ejemplo: Ciencias médicas, Ciencias de la Salud-Medicina básica-Inmunología)**  
[https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde\\_ford.html](https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html)  
Ingeniería, Tecnología - Ingeniería Ambiental - sensores remotos
- Originalidad del Trabajo**  
Con la presentación de esta ficha, el(la) autor(a) o autores(as) señalan expresamente que la obra es original, ya que sus contenidos son producto de su directa contribución intelectual. Se reconoce también que todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal.
- Autorización de publicación**  
El(los) titular(es) de los derechos de autor otorga a la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), la autorización para la publicación del documento indicado en el punto 2, bajo la *Licencia creative commons* de tipo BY-NC: Licencia que permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial por lo que la Universidad deberá publicar la obra poniéndola en acceso libre en el repositorio institucional de la UNTRM y a su vez en el Registro Nacional de Trabajos de Investigación-RENATI, dejando constancia que el archivo digital que se está entregando, contiene la versión final del documento sustentado y aprobado por el Jurado Evaluador.

Chachapoyas, 14, febrero, 2023

  
Firma del autor 1

  
Firma del Asesor 1

Firma del autor 2

  
Firma del Asesor 2

## **DEDICATORIA**

### ***A MI FAMILIA***

*A mi madre y mi padre que me apoyaron durante todo este trayecto e hicieron lo posible para formarme en mi vida profesional.*

### ***A MIS AMIGOS***

*A los docentes, compañeros y amigos profesionales que me instruyeron de una u otra manera para lograr mis metas*

## **AGRADECIMIENTO**

Al Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES), que a través del proyecto CUI N° 2255626 “Creación del Servicio de un Laboratorio Geomática y Teledetección de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas” - GEOMÁTICA; orientó la ejecución de la investigación.

También agradezco a mis asesores, por sus aportes en todas las etapas de la ejecución de este proyecto de investigación. Asimismo, a mis jurados evaluadores que me brindaron su conocimiento en las correcciones necesarios para culminar este anhelado proyecto, y estaré agradecido de haberme formado como en este trayecto de mi carrera profesional.

## **AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

**Ph.D. Jorge Luis Maicelo Quintana**

Rector

**Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres**

Vicerrector Académico

**Dra. María Nelly Luján Espinoza**

Vicerrectora de Investigación

**Ph.D. Ricardo Edmundo Campos Ramos**

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

## VISTO BUENO DEL ASESOR 1 DE LA TESIS



**UNTRM**

**REGLAMENTO GENERAL**  
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE  
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

### ANEXO 3-L

#### VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (X)/Profesional externo ( ), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada CAMBIOS DE USOS  
COBERTURAS Y USOS DEL SUELO EN LA MICROCUENCA DEL RIO  
JUCUSRAMBA, AMAZONAS (PERÚ), 1942-2052.  
del egresado Bach. Rodago Caltay Reynaga  
de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental  
de esta Casa Superior de Estudios.

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 20 de enero de 2023

  
Firma y nombre completo del Asesor

Mg. Nilton Beltran Rojas Briceño.



## VISTO BUENO DEL ASESOR 2 DE LA TESIS



**UNTRM**

**REGLAMENTO GENERAL**  
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE  
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

### ANEXO 3-L

#### VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (X)/Profesional externo ( ), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada CAMBIOS DE LOS  
COBERTURAS Y USOS DEL SUELO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO  
JUCUSBAMBA, AMAZONAS (PERÚ), 1992-2012  
del egresado Bach. Rodrigo Córdaz Reynaga  
de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.  
de esta Casa Superior de Estudios.



El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 20 de Enero de 2023

Firma y nombre completo del Asesor  
Ing. Rolando Salas Lopez

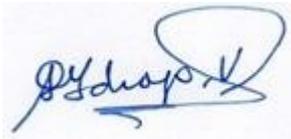
**JURADO CALIFICADOR**



---

**Ligia Magali García Rosero, PhD**

PRESIDENTE



---

**Ing. Guillermo Idrogo Vásquez**

SECRETARIO



---

**Mg. Segundo Grimaldo Chávez Quintana**

VOCAL

# CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



**UNTRM**

**REGLAMENTO GENERAL**  
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE  
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

## ANEXO 3-Q

### CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Cambios de las coberturas y usos del suelo en la microcuenca del  
rió Tucumbamba, Amazonas (Pauí), 1992 - 2052

presentada por el estudiante ( ) / egresado (  ) Rodrigo Cachay Reynaga

de la Escuela Profesional de Ingeniería civil y ambiental

con correo electrónico institucional 7686261652@untrm.edu.pe

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- La citada Tesis tiene 24 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (  ) / igual ( ) al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- La citada Tesis tiene \_\_\_\_\_ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.



Chachapoyas, 26 de enero del 2023

  
SECRETARIO

  
PRESIDENTE

  
VOCAL

OBSERVACIONES:

.....  
.....

# ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL  
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE  
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

## ANEXO 3-5

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Chachapoyas, el día 10 de febrero del año 2023, siendo las 10:00 horas, el aspirante: Rodrigo Cachay Reynaga, asesorado por Nilton Beltrán Rojas Becerra y Roberto Salas Lopez defiende en sesión pública presencial () / a distancia ( ) la Tesis titulada: Cambios de las coberturas y usos del suelo en la microcuenca del río Jurusbamba, Amazonas (Perú), 1942-2022, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental, a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente: Ph.D. Ligen Magal García Basco

Secretario: Ing. Guillermo Istrogo Vázquez

Vocal: Ms. Segrub Gromallo Chavez Quintana

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.



Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

Aprobado () por Unanimidad () / Mayoría ( )

Desaprobado ( )

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 11:00 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.

[Firma]  
SECRETARIO

[Firma]  
PRESIDENTE

[Firma]  
VOCAL

OBSERVACIONES:  
.....

## CONTENIDO

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
AUTORIDADES UNIVERSITARIAS .....	v
VISTO BUENO DEL ASESOR 1 DE LA TESIS .....	vi
VISTO BUENO DEL ASESOR 2 DE LA TESIS .....	vii
JURADO CALIFICADOR .....	viii
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS .....	ix
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS.....	x
CONTENIDO .....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
I. INTRODUCCIÓN .....	17
II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
2.1 Área de estudio .....	19
2.2 Flujograma metodológico.....	20
2.3 Determinación de usos y coberturas del suelo en la microcuenca Jucusbamba 1992-2022.....	20
2.3.1 Softwares, materiales y equipos .....	20
2.3.2 Preprocesamiento de la información satelital .....	22
2.3.3 Clasificación de los Cambios de las Coberturas y Usos del Suelo (CCUS) .....	23
2.3.4 Clasificación de Random Forest supervisada .....	23
2.3.5 Interpretación visual .....	24
2.3.6 Corrección topológica .....	24
2.4 Exactitud temática.....	25
2.5 Indicadores de tasas y matrices de cambio.....	26
2.6 Predicción de los cambios de Cobertura y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba para los periodos 2022-2052.....	27
2.6.1 Variables predictoras .....	27

2.6.2 Predicción y validación al futuro de los cambios de cobertura y usos del suelo CCUS .....	28
2.7 Determinación de la concentración de pérdida de bosques en la microcuenca Jucusbamba.....	29
III. RESULTADOS .....	30
3.1 Mapas de cambios de la cobertura y usos del suelo (CCUS) en la microcuenca Jucusbamba durante 1992-2022. ....	30
3.2 Concentración de pérdida de bosque en la microcuenca Jucusbamba en los periodos 1992-2022. ....	35
3.3 Mapas de cambios de la cobertura y usos del suelo (CCUS) en la microcuenca Jucusbamba durante 2022-2052. ....	37
3.4 Concentración de pérdida de bosque en la microcuenca Jucusbamba en los periodos 2022-2052. ....	41
IV. DISCUSIÓN.....	43
V. CONCLUSIONES .....	45
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
ANEXOS.....	51
Anexo 1. Áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada de imágenes de satélite 51	
Anexo 2. Sitios de verificación para determinar la exactitud temática de la Clasificación. 56	
Anexo 3. Panel Fotográfico de los tipos de coberturas de los CUS .....	57
Anexo 4. Validación y simulación en QGis con el algoritmo Molusce Plugin .....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Softwares, materiales y equipos .....	20
Tabla 2. Filtrado y colección de las imágenes de satélites. ....	21
Tabla 3. Selección de variables auxiliares de la colección (Índices espectrales y sus respectivas fórmulas).....	22
Tabla 4. Clases de CUS determinadas para el estudio. ....	23
Tabla 5. Matriz de confusión basada en Chuvieco (2002) y MINAM (2014).....	26
Tabla 6. Matriz de tabulación cruzada, basándose en la FAO (1996) y Pontius et al. (2004).....	27
Tabla 7. Dinámica de los cambios de coberturas y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba en 1992, 2007 y 2022.....	30
Tabla 8. Cálculo de puntos de verificación para el mapa CUS 2022.....	30
Tabla 9. Matriz de confusión para el mapa CUS 2022.....	31
Tabla 10. Matriz de tabulación cruzada y tasa de cambio para el periodo de 1992 – 2007 .....	33
Tabla 11. Matriz de tabulación cruzada y tasa de cambio para el periodo de 2007 – 2022 .....	33
Tabla 12. Pérdida de la superficie de bosques concentración/año en la microcuenca Jucusbamba en los periodos 1992-2022 .....	35
Tabla 13. Dinámica de los cambios de coberturas y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba en 2022, 2037 y 2052.....	37
Tabla 14. Matriz de tabulación cruzada y tasa de cambio para el periodo de 2022 – 2037 .....	39
Tabla 15. Matriz de tabulación cruzada y tasa de cambio para el periodo de 2037 – 2052 .....	39
Tabla 16. Pérdida de la superficie de bosques concentración/año en la microcuenca Jucusbamba en los periodos 2022-2052 .....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la microcuenca Jucusbamba .....	19
Figura 2. Flujograma metodológico para predecir los CCUS. ....	20
Figura 3. Clasificación Supervisada sin limpieza-Clasificación Supervisada con limpieza.....	25
Figura 4. Variables predictoras de CCUS para el año 2037 y 2052 .....	28
Figura 5. Funcionamiento de la Red Neuronal Artificial (ANN) .....	29
Figura 6 Cambios de coberturas y usos del suelo desde los años 1992 al 2022 en la microcuenca Jucusbamba .....	31
Figura 7. Coberturas y usos del suelo de la microcuenca Jucusbamba de 1992-2022....	32
Figura 8. Cambios de las coberturas y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba durante 1992 – 2022.....	34
Figura 9. Concentración de la pérdida de bosques en la microcuenca Jucusbamba en los periodos 1992-2022.....	36
Figura 10 Cambios de coberturas y usos del suelo desde los años 1992 al 2022 en la microcuenca Jucusbamba .....	37
Figura 11. Coberturas y usos del suelo de la microcuenca Jucusbamba del 2037-2052.	38
Figura 12. Cambios de las coberturas y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba durante 2022 – 2052.....	40
Figura 13. Concentración de pérdida de bosque en la microcuenca Jucusbamba en los periodos 2022-2052.....	42

## RESUMEN

En la actualidad, el uso y cobertura del suelo sufre alteraciones en su estructura por las diferentes actividades antrópicas que se desarrollan. Los sistemas de información geográfica (SIG) y la teledetección son la tendencia en el manejo de información geoespacial que, a través de las imágenes satelitales, permiten evaluar reportes de los cambios del uso y cobertura del suelo. Este estudio tuvo como objetivo analizar los cambios de las coberturas y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba, Amazonas (Perú), 1992-2052. Las imágenes satelitales de Landsat de 1992 a 2007 y Sentinel para 2022, estas fueron clasificadas por Random Forest en Google Earth Engine (GEE). La clasificación se basó en cinco clases CCUS, es decir, Áreas urbanizadas (ZU); Mosaico de Pastos y Cultivos (PC); Bosques (BO); Herbazal / Pajonal (PH) y Vegetación arbustiva / herbácea (AH). Los mapas obtenidos demostraron cambios de áreas de 1992 a 2022 en diferentes clases, donde las Áreas urbanizadas y Mosaico de Pastos y Cultivos aumentaron en 0.76% y 24.36%, respectivamente. Sin embargo, los Bosques y la Vegetación arbustiva/herbácea disminuyeron un 8.89% y 16.25%, respectivamente. El complemento Molusce Plugin y su algoritmo de red neuronal artificial (ANN) se utilizó para simular los CCUS entre 2037 y 2052. Se obtuvo un índice global de precisión del 89.8% y el coeficiente kappa fue de 0.86%. Los mapas de predicción de 2037 a 2052 demostraron tendencias decrecientes en Bosques (-1.47 %) y Vegetación arbustiva/herbácea (-3.35%) y tendencias crecientes en Mosaico de Pastos y Cultivos (4.74%) y Áreas urbanizadas (0.07%). Los resultados obtenidos permitirán al usuario tomar medidas de control de la administración de las coberturas del suelo, como también las decisiones al analizar los cambios de intensidad de cada tipo de cobertura y promover planes de desarrollo sostenible y la conservación ambiental.

**Palabras clave:** Cambios de cobertura y uso del suelo, Random Forest, Molusce plugin, red neuronal artificial (ANN).

## ABSTRACT

At present, the use and cover of the soil suffers alterations in its structure due to the different anthropic activities that take place. Geographic information systems (GIS) and remote sensing are the trend in the management of geospatial information that, through satellite images, allow the evaluation of reports on land use and land cover changes. This study aimed to analyze the changes in land cover and land use in the Jucusbamba micro-basin, Amazonas (Peru), 1992-2052. Landsat satellite images from 1992 to 2007 and Sentinel for 2022, these were classified by Random Forest on Google Earth Engine (GEE). The classification was based on five CCUS classes, that is, Urbanized Areas (ZU); Pasture and Crop Mosaic (PC); Forests (BO); Grassland / Pajonal (PH) and Shrub / Herbaceous Vegetation (AH). The maps obtained showed area changes from 1992 to 2022 in different classes, where Urbanized Areas and Pastures and Crops Mosaic increased by 0.76% and 24.36%, respectively. However, Forests and Shrub/herbaceous vegetation decreased by 8.89% and 16.25%, respectively. The Molusce Plugin and its artificial neural network (ANN) algorithm were used to simulate the CCUS between 2037 and 2052. An overall accuracy rate of 89.8% was obtained and the kappa coefficient was 0.86%. The forecast maps from 2037 to 2052 demonstrated decreasing trends in Forests (-1.47%) and Shrub/Herbaceous Vegetation (-3.35%) and increasing trends in Pasture and Crop Mosaic (4.74%) and Urbanized Areas (0.07%). The results obtained will allow the user to take control measures for the administration of land cover, as well as decisions when analyzing the intensity changes of each type of cover and promote sustainable development plans and environmental conservation.

**Key words:** Land cover and use changes, Random Forest, Molusce plugin, artificial neural network (ANN).

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la problemática ambiental preocupa a la sociedad debido a que la deforestación está causando estragos sobre el ambiente (Montes *et al.*, 2017). De tal manera que la superficie mundial con respecto a tierras forestales se redujo de 129 millones de hectáreas (un 3,1%) desde 1990 a 2015, con una pérdida de 4 millones de hectáreas (FAO, 2016). Los cambios de uso y cobertura del suelo son un factor clave en el deterioro ambiental a escala global, regional y local (Reynoso *et al.*, 2015). A la vez, la Amazonia ha sufrido grandes transformaciones en sus bosques desde mediados del siglo pasado (Calampa & Yohel, 2018).

Estos cambios en el mundo en 2010 indican que las tierras agrícolas poseen un (52%) y los bosques un (19%), en Europa y Rusia las tierras agrícolas ocupan un (21%) y los bosques un (46%), a nivel mundial en 2015 la agricultura ocupa (37.7%) de la superficie y otras tierras como los bosques ocupan (30.7% y 31,6%) (FAO, 2016). Asimismo, el incremento de la población viene generando impactos sobre los recursos naturales, debido al mal uso del suelo en generar bienes y servicios (Gordillo-Ruiz, y Castillo-Santiago, 2017). De manera que los ecosistemas están sufriendo modificaciones en su estructura y como también en su funcionamiento (Nené-Preciado *et al.*, 2017).

Por cobertura del suelo se entiende como la ocupación existente que presenta el suelo, ya sea estos espacios urbanos, vegetación natural o ya cultivos agrícolas (Chuvienco y Huete, 2009). Mientras que el uso del suelo es aquella transformación que ha sufrido la cobertura en su estructura, ya sea por la actividad antrópica o natural (Nené-Preciado *et al.*, 2017; Vázquez *et al.*, 2016; FAO, 2016).

La cubierta vegetal de bosques, selvas y matorrales cuando se encuentran en su naturaleza de primarias y secundarias nos indica que no hay cambio, sin embargo, si cualesquiera de estas sufren un cambio de transformación a cubiertas antropogénicas, este cambio nos indica que hay un proceso de deforestación (Velázquez *et al.*, 2002).

El uso es el cambio previsto de la cobertura, donde la cobertura forestal transita a no forestal (urbano, agrícola, etc.), y se aprecia al momento de identificar el diámetro del tronco seleccionado es donde originan cambios en la cobertura del uso del suelo (Martin, 2008).

La ocupación del suelo esta relaciona con la actividad del hombre, puesto que ha sido el centro de todos los cambios del uso de las coberturas del suelo en la actualidad, es decir, la cobertura terrestre es muy extensa, por lo que se necesitan técnicas de modelación para facilitar la interpretación de su estructura. En tal sentido, una simulación nos permite estudiar las características presentes del mundo, ya que utiliza datos geoespaciales que representan el espacio geográfico en un momento temporal y proyecciones de escenarios a futuro vinculado a posibilidades de patrones de usos de suelo ante los posibles cambios ocurrientes que podrían pasar (Gutiérrez, 2019).

Goretta (2019), indica que los modelos computarizados simulan la operatividad del cerebro en el procesamiento de información y predicen los cambios de un fenómeno o problema. Por lo que, investigadores de la UNNE simulan los cambios de escenarios futuros usando redes artificiales neuronales hacia el año 2030.

Por otro lado, para determinar la clasificación de la cobertura vegetal, la detección de sus variaciones temporales y generar la mayor información posible de las imágenes satelitales en materia de estudio del uso del suelo, se requiere disponer de métodos y herramientas que permitan estimar estos cambios y a su vez optimizar las tareas en la clasificación e interpretación. El algoritmo de La Red Neuronal Artificial (ANN) demuestra ser un mecanismo para realizar estos cálculos y reducir recursos (Jaramillo y Antunes ,2018).

Por el tanto, estudios sobre cambios en la cobertura y el uso del suelo CCUS (Ashaolu et al., 2019; Buğday y Buğday, 2019; El-Tantawi et al.,2019), determinan que estos cambios se originan por factores como la población, pendiente, elevación y agricultura. Mediante el uso de imágenes satelitales para el procesamiento, con el programa Molusce Plugin para la simulación de estos cambios a futuro. Asimismo, indican las pérdidas en las coberturas forestales y aumentos en la población.

Por lo que este estudio determinó los cambios de las coberturas y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba, Amazonas (Perú),1992-2052, estimó los cambios de cobertura y uso del suelo entre los períodos 1992 – 2007 y 2007 – 2022 a través de clasificación espectral de imágenes de satélite y matrices de tabulación cruzada y tasas de cambio; Predecir los cambios de cobertura y uso del suelo utilizando Molusce Plugin para los períodos 2022 – 2037 y 2037 – 2052.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Área de estudio

La microcuenca Jucusbamba se encuentra ubicado con coordenadas UTM 176703.42 m E y 9329116.67m S de la Provincia de Luya, del departamento Amazonas, limita con el Este con la provincia de Chachapoyas, al Oeste con Chota, al Sur con Celendín y al Norte con Bongará, abarca una superficie aproximada de 191.67 km<sup>2</sup>, la microcuenca abarca los distritos de San Cristobal, Lamud, Luya, Trita, Inguilpata y Lonya Chico. (Figura 1). La microcuenca en lo forestal está conformada por el bosque húmedo de montañas altas y matorral húmedo (Reátegui y Martínez,2017) y por cobertura vegetal tenemos al bosque de montaña altimontano (Bm-al), Bosque de montaña montano (Bm-mo), Jalca (Jal) y Áreas de bosque no amazónico (Ano-ba) (MINAM, 2015).

Asimismo, dentro de la superficie de la microcuenca se aprecia lugares turísticos como los Sarcófagos de Karajía y las Cavernas de Quiocta a una altitud de 2700 m.s.n.m aproximadamente, y al sur se encuentra la ACP Huaylla Belen – Colcamar.

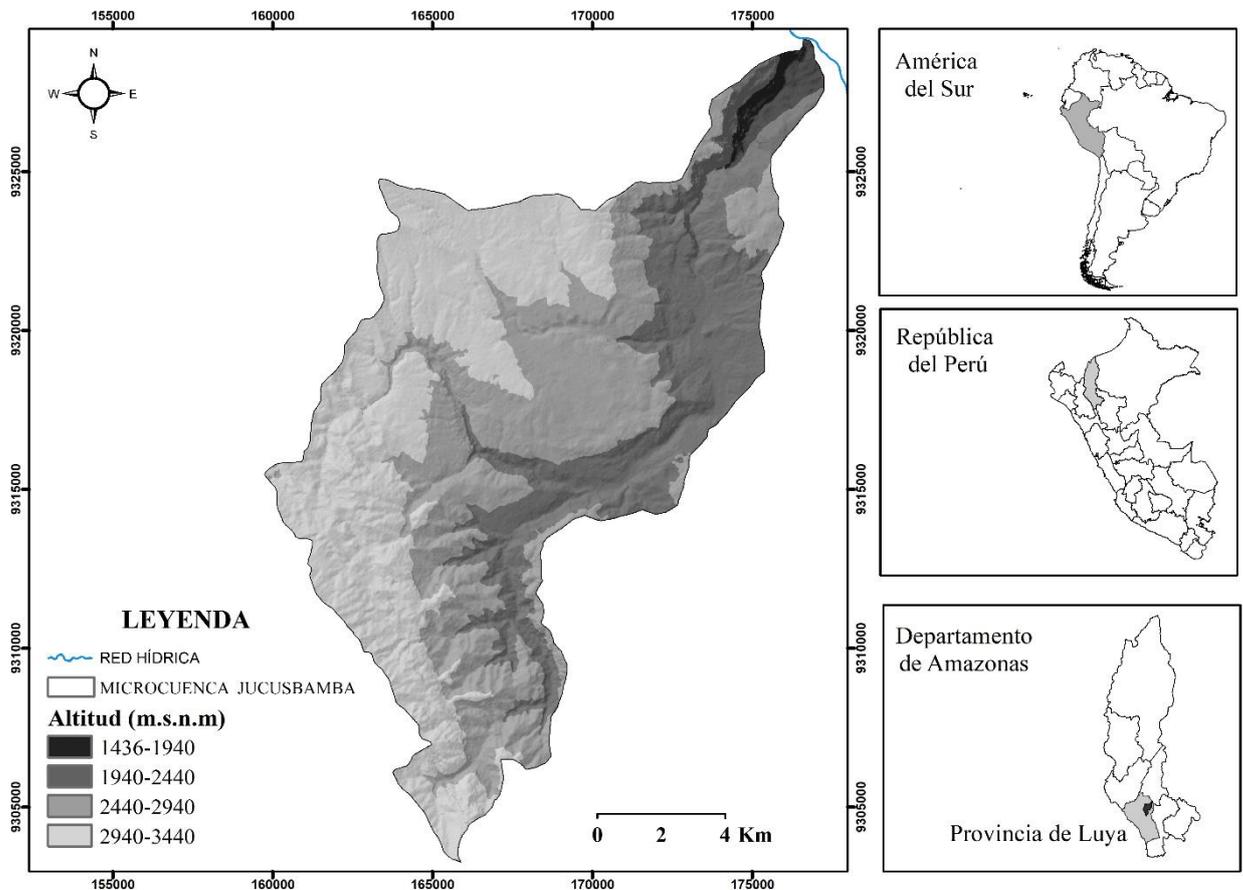
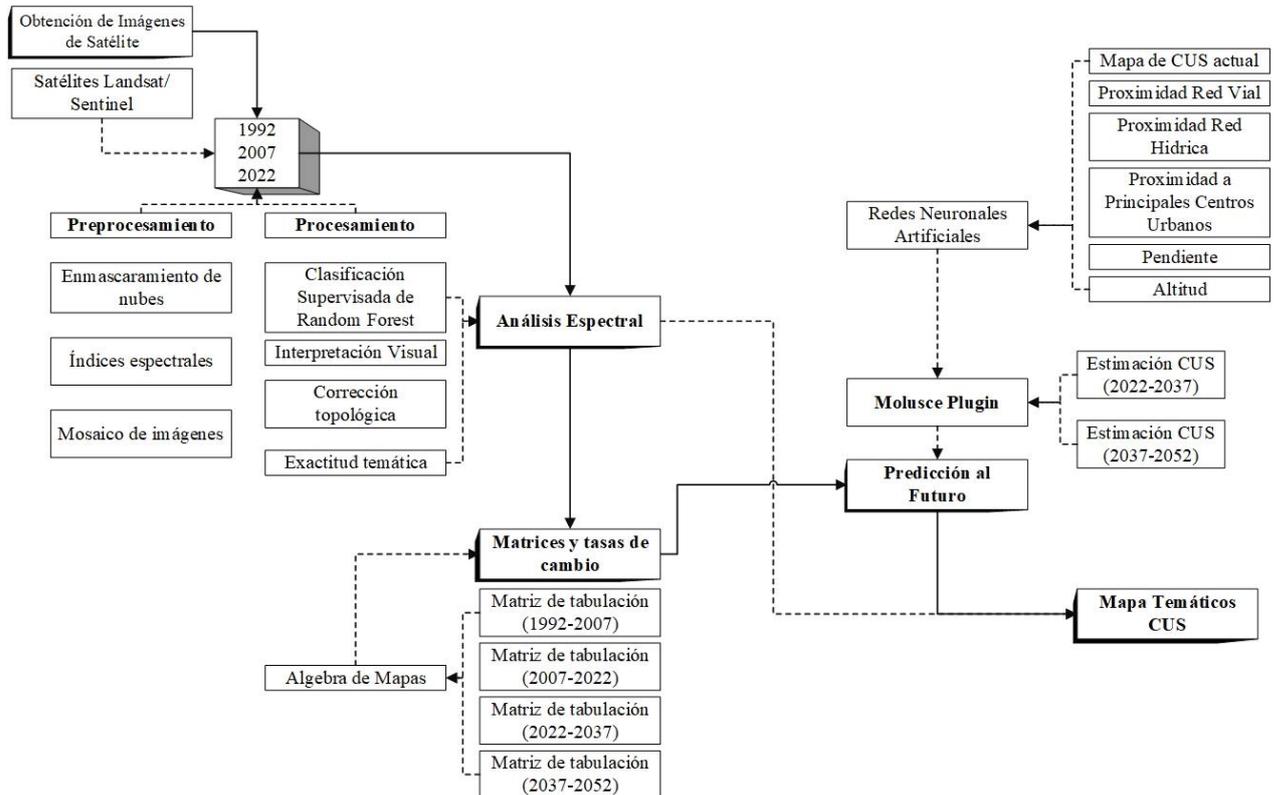


Figura 1. Localización de la microcuenca Jucusbamba

## 2.2 Flujograma metodológico

Para predecir los cambios de los usos y las coberturas del suelo se utilizó como herramienta a Molusce Plugin y su algoritmo redes neuronales artificiales para la microcuenca Jucusbamba, Amazonas (Perú), 1992-2052 y se desarrollará de la siguiente manera (Figura 2).



**Figura 2.** Flujograma metodológico para predecir los CCUS.

## 2.3 Determinación de usos y coberturas del suelo en la microcuenca Jucusbamba 1992-2022

### 2.3.1 Softwares, materiales y equipos

La información utilizada en la siguiente investigación se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Softwares, materiales y equipos

<b>Materiales y Equipos</b>	▪ Laptop LENOVO Core i5- 8 GB RAM
	▪ GPS Garmin Montana 650,
	▪ USB 16 GB
	▪ Papel Bond
<b>Software</b>	▪ Software libre QGIS (ver. 2.18.2)
	▪ Software ArcGIS (ver. 10.5.0)

	▪ Google Earth Pro (ver. 7.3.6.9326)
	▪ Google Erth Engine
	▪ SAS Planet (ver. 160707).
	▪ Windows de Microsoft Office 2019
<b>Datos cartográficos</b>	▪ Imágenes de Satelitales (Tabla 2)
	▪ Cuadrante 13g y 13h de la Carta Nacional del Instituto Geofísico Nacional (IGN) a escala 1:100 000
	▪ Red vial del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).
	▪ División política departamental, provincial y distrital del Perú elaborada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).
	▪ Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM) de ALOS PALSAR de 12,5 metros de resolución espacial, de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (AJAX).

Para obtener los mapas de cambios de cobertura y usos del suelo (CCUS) se procedió a realizar una colección de imágenes satelitales en un rango de 3 años para el satélite Landsat y el satélite Sentinel, obtenidas del portal de Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) a través de la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) (<https://code.earthengine.google.com>) (Tabla 2). Los criterios para la selección de estas imágenes satelitales fueron: a) No presentar errores de distorsión; b) Poseer un máximo de 40 % de nubes y sombras c) Filtrado de imágenes satelitales durante un periodo de 3 años (Chuvieco, 1998; Phan et al., 2020).

**Tabla 2.** Filtrado y colección de las imágenes de satélites.

<b>Año establecido</b>	<b>Satélite Sensor</b>	<b>N° imágenes usadas para la Colección</b>	<b>Cobertura de nubes</b>	<b>Bandas espectrales utilizadas</b>
1989-01-01 al 1992-05-31	Landsat 5 TM	7 IMG_SATELITALES (LANDSAT/LT05/C01/T1_SR)	40%	1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7
2004-01-01 al 2007-05-31	Landsat 7 ETM+	8 IMG_SATELITALES LANDSAT/LE07/C01/T1_SR		
2019-01-01 al 2022-05-31	Sentinel 2A	27 IMG_SATELITALES (COPERNICUS/S2_SR)	40%	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,8,8A,9,10 ,11y 12

### 2.3.2 Preprocesamiento de la información satelital

El preprocesamiento fue realizado de la siguiente manera con el programa de código abierto Google Earth Engine (GEE): i) el enmascaramiento de nubes donde GEE tiene el algoritmo de Cloud Masking que elimina cada pixel nuboso y lo excluye de la imagen final, ii) aplicación de Índices espectrales que son aquellas combinaciones de bandas de una imagen satelital y se usan para mostrar la cobertura vegetal respecto a su firma espectral y iii) Mosaico de las imágenes satelitales que es aquella unión de todas las imágenes satelitales obtenidas en los resultados anteriores (Di Bella et al.,2008; Gorelick,2013; Phan et al., 2020).

Ahora bien, con la finalidad de tener una mejor clasificación se agregó variables auxiliares, es decir, índices espectrales que ayudan aumentar la clasificación de la cobertura del uso del suelo. Las fórmulas y definiciones de estas variables se aprecian en la Tabla 3. De acuerdo, a varios estudios han demostrado que las variables topográficas, la elevación, orientación y pendiente están relacionas a la distribución del tipo de uso de la cobertura del suelo (Jin,2018).

**Tabla 3.** Selección de variables auxiliares de la colección (Índices espectrales y sus respectivas fórmulas).

Índice espectral	Formula	Descripción
NDVI	$(NIR - RED) / (NIR + RED)$	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
EVI	$2.5 * ((NIR - RED) / (NIR + 6 * RED - 7.5 * BLUE + 1))$	Índice de Vegetación Mejorada
SAVI	$(NIR - RED) / (NIR + RED + 0.5) * (1.5)$	Índice de Vegetación Ajustada al Suelo
NDWI	$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	Índice de Agua de Diferencia Normalizada
NBRI	$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	Índice Normalizado de Área Quemada
GLI	$(2 * GREEN - RED - BLUE) / (2 * GREEN + RED + BLUE)$	Índice de Vegetación Alternativo
VARI	$(GREEN - RED) / (GREEN + RED - BLUE)$	Índice de Resistencia Atmosférica Visible
GCI	$((NIR) / (GREEN)) - 1$	Índice de Calcinación Normalizado
RGR	$((RED) / (GREEN))$	Índice de Proporción Rojo - Verde
SIPI	$((NIR - BLUE) / (NIR - RED))$	Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura
ARVI	$((NIR - (2 * RED) + BLUE) / (NIR + (2 * RED) + BLUE))$	Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera

Por lo tanto, para este estudio se utilizó el Modelo de elevación Digital de la Misión Topográfica de Radar del Transbordador (DEM STRM de 30m de resolución espacial), donde se generaron mapas de pendientes, altitud y aspecto para el estudio, que fueron utilizadas como variables auxiliares dentro de la composición de datos para la clasificación.

### 2.3.3 Clasificación de los Cambios de las Coberturas y Usos del Suelo (CCUS)

Tomando como soporte la metodología de CORINE Land Cover aplicada para Perú (MINAM, 2014b), y con salidas a campo se determinaron el uso y cobertura terrestre para el área de estudio y que se muestran en la Tabla 3, donde se jerarquizó en Tres Niveles, de las cuales se obtuvo 5 tipos de coberturas y usos del suelo con 196 Áreas de Entrenamiento por un receptor GPS: Áreas urbanizadas (ZU); Mosaico de Pastos y Cultivos (PC); Bosques (BO) ; Herbazal / Pajonal (PH) y Vegetación arbustiva / herbácea (AH).

**Tabla 4.** Clases de CUS determinadas para el estudio.

Nivel I	Nivel II	Nivel III	CUS
1. Área artificializada	1.1. Áreas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo	ZU
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo	
2. Áreas agrícolas	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.2 Mosaico de pastos y cultivos	PC
3. Bosques y áreas mayormente naturales	3.1. Bosques	3.1.1. Bosque denso bajo	BO
		3.1.2. Bosque abierto bajo	
		3.1.3. Bosque denso alto	
		3.1.4. Bosque abierto alto	
	3.3. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.3.1 Herbazal/Pajonal	PH
3.3.4 Vegetación arbustiva/ herbácea		AH	
3.3.7 Arbustal-herbazal/ área intervenida			

### 2.3.4 Clasificación de Random Forest supervisada

En la actualidad, Random Forest es considerado uno de los algoritmos con mayor uso para la clasificación de la cobertura terrestre junto con datos de sensores remotos (Gislason et al., 2006; Cánovas-García, 2017), esto debido a (Rodríguez-Galiano *et al.*, 2012; Xia *et al.*, 2017): i) mayor manejo de valores y conjunto de datos ruidosos; ii) buen rendimiento frente a datos de múltiples fuentes; iii) Mayor precisión que otros clasificadores populares y iv) mejor

rendimiento mediante la selección de variables importantes debido a su aprendizaje automático.

Es un meta-clasificador que utiliza árboles de decisiones como clasificador de base, de manera que cada clasificador genera su propio voto para asignar la clase más frecuente (Foody, 2002; del Toro Espín *et al.*, 2015).

Teniendo en cuenta lo mencionado se realizó la Clasificación Supervisada de Random Forest, seleccionando 10 árboles de decisiones sobre las firmas espectrales de 196 puntos de Áreas de Entrenamiento que fueron recolectados en campo.

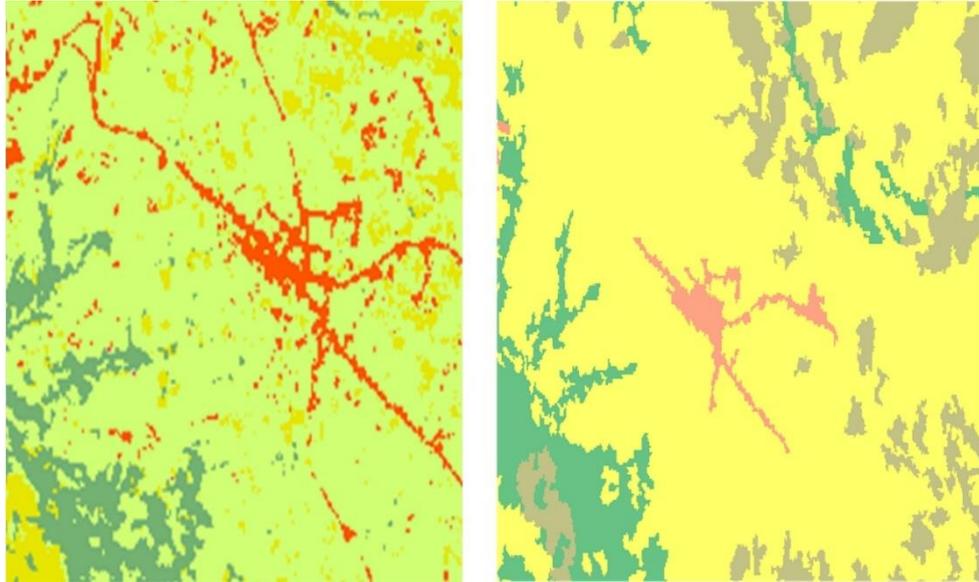
### **2.3.5 Interpretación visual**

Método utilizado por la FAO (1996), consiste en actualizar un mapa para una fecha indicada, de manera que nos permitirá interpretar la imagen con una fecha siguiente (Osorio *et al.*, 2015; Nené-Preciado *et al.*, 2017; Gutiérrez *et al.*, 2016). Esto se realizó para corregir errores, visualmente identificables, del algoritmo de clasificación.

### **2.3.6 Corrección topológica**

Los datos topológicos permiten evaluar y detectar errores en la digitalización o en la clasificación supervisada (conversión de datos ráster a vector). En el procesamiento de la clasificación de los mapas de CUS elaborados y trabajados a escala 1:25000 (se procedió a eliminar polígonos menores a 0.5 hectáreas), esto fue determinado por la Área Mínima Cartografiable (AMC) en varias escalas desarrollada por Vargas (1992). Pero, debido a que en el estudio algunas coberturas clasificadas no cumplen con el AMC, no fueron eliminadas como por ejemplo la cobertura de Zona urbana Figura 3 (polígonos menores a 0.5 ha puesto que son centros poblados).

Este proceso permite al evaluador mejorar la calidad de presentación del material clasificado, es decir, una vez realiza clasificación supervisada esta data se encuentra en datos ráster, por lo que se necesita pasar a datos vector y en esa conversión se producen errores topológicos.



**Figura 3.** Clasificación Supervisada sin limpieza-Clasificación Supervisada con limpieza

#### 2.4 Exactitud temática

Para la evaluación temática de CUS según la fórmula establecida por Cochran (1977) se realiza con un total de 302 sitios de verificación, de manera que se considera cada área con relación al tipo de cubierta que pertenece, adicional a esto el evaluar tiene que ir a campo para su validación (Rojas *et al.*, 2019)

Como siguiente proceso se utiliza una matriz de confusión, donde esta representa aquellos cambios que sufre la imagen satelital al momento de ser clasificada, ya que los datos que brinda la tierra al ser observada, nos refleja las distintas categorías de clasificación (Satélite) y de referencia (tierra), puesto que se obtendrá exactitudes e inexactitudes entre la clasificación y la fuentes de referencia (Tabla 4), de manera que las columnas indican la clase de referencia y las filas las categorías de clasificación. La oblicua de esta matriz representa los puntos muestreados que indican la interacción mutua de ambas (clasificación y referencia), en cambio los laterales representan los errores de clasificación. La precisión global de esta matriz son las concordancias de puntos clasificados y puntos muestreados. Las celdas de la columna que no fueron clasificadas nos indica puntos asignados correctamente pero no fueron identificados en el mapa, mientras que las celdas sobrantes de la fila nos indican puntos clasificados que no corresponden con la realidad (Chuvieco & Huete, 2009)

**Tabla 5.** Matriz de confusión basada en Chuvieco (2002) y MINAM (2014).

Resultados de clasificación	Resultados de referencia						
	Referencia 1	Referencia 2	.....	Referencia n	Total	Exactitud usuario	Error comisión
Clase 1	a <sub>11</sub>	a <sub>12</sub>	.....	a <sub>1n</sub>	a <sub>1+</sub>	a <sub>11</sub> / a <sub>1+</sub>	1 - a <sub>11</sub> / a <sub>1+</sub>
Clase 2	a <sub>21</sub>	a <sub>22</sub>	.....	a <sub>2n</sub>	a <sub>2+</sub>	a <sub>22</sub> / a <sub>2+</sub>	1 - a <sub>22</sub> / a <sub>2+</sub>
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Clase n	a <sub>n1</sub>	a <sub>n2</sub>	.....	a <sub>nn</sub>	a <sub>n+</sub>	a <sub>nn</sub> / a <sub>n+</sub>	1 - a <sub>nn</sub> / a <sub>n+</sub>
Total	a <sub>+1</sub>	a <sub>+2</sub>	.....	a <sub>+n</sub>	<b>m</b>		
Exactitud productor	a <sub>11</sub> / a <sub>+1</sub>	a <sub>22</sub> / a <sub>+2</sub>	.....	a <sub>nn</sub> / a <sub>+n</sub>			
Error omisión	1 - a <sub>11</sub> / a <sub>+1</sub>	1 - a <sub>22</sub> / a <sub>+2</sub>	.....	1 - a <sub>nn</sub> / a <sub>+n</sub>			

Para evaluar la exactitud al momento de clasificar, e identificar el error (del productor y del usuario) se utiliza el índice de Kappa, donde (k= la diferencia de concordancia entre la referenciación y los datos de clasificación) (Rojas *et al.*, 2019)

$$k = \frac{m \sum_{n=1}^r a_{nn} - \sum_{n=1}^r a_{n+} a_{+n}}{m^2 - \sum_{n=1}^r a_{n+} a_{+n}} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Por lo tanto, r es el número de filas de la matriz; a<sub>(nn)</sub> son los números de observaciones en la columna n y la fila n; a<sub>(n+)</sub>, a<sub>(+n)</sub> son el total de marginal de la columna n y la fila n, de manera que, m es el total de observaciones.

## 2.5 Indicadores de tasas y matrices de cambio

Mediante el álgebra de mapas se estima las pérdidas o diferencias de la cobertura vegetal calculando la superficie por áreas de las coberturas por cada año para su análisis previo (Montes *et al.*, 2017). Se utilizó la fórmula de la FAO (1996) para calcular la tasa anual de cambios, en la presente ecuación;

$$s = \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^{1/t_2 - t_1} - 1 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

De manera que, S<sub>1</sub> y S<sub>2</sub> pertenecen a las áreas de CUCS de la fecha t<sub>1</sub> y t<sub>2</sub>, respectivamente. El valor negativo de s indica la pérdida de CUCS, puesto que, s tiende a ser mayor que cero, lo cual significa que hay un aumento.

Una matriz de cambio representa la base de la recopilación de información desde un análisis general hasta un detallado de aquellos cambios que ocurren en el territorio, de manera que evalúa si estos cambios son generados por una transición sistemática o son una transmisión aleatoria, lo que busca esta matriz es el

intercambio entre las clases de coberturas de la superficie ya sea de ganancias o pérdidas (Vázquez & Rocha, 2009)

**Tabla 6.** Matriz de tabulación cruzada, basándose en la FAO (1996) y Pontius et al. (2004)

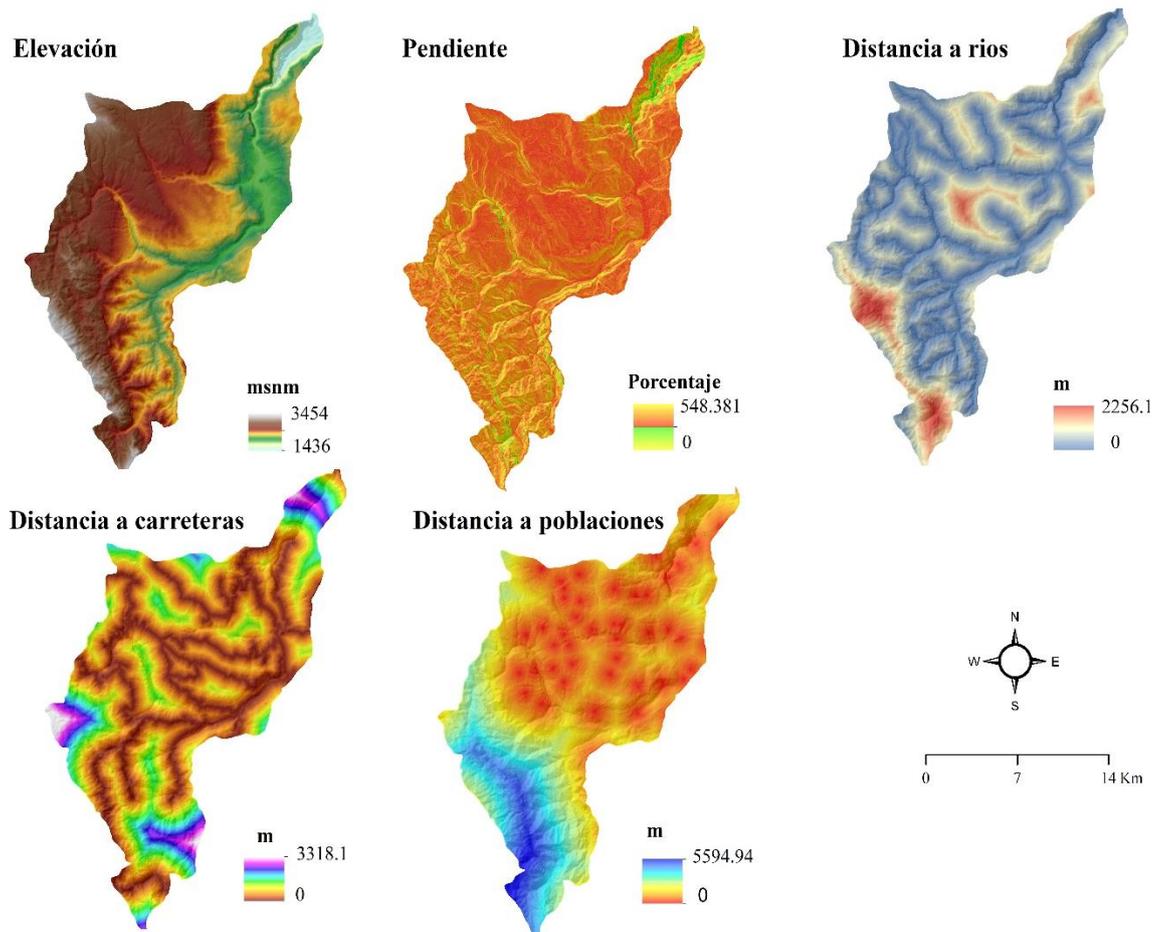
Fecha 1	Fecha 2				Total fecha 1 (P <sub>i+</sub> )	Pérdida (L <sub>i</sub> )	Cambio total (Ct)	Cambio neto (Cn)	Intercambio (Int)
	Clase 1	Clase 2	....	Clase j					
Clase 1	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	....	P <sub>1j</sub>	P <sub>1+</sub>	P <sub>1+</sub> - P <sub>11</sub>	L + G	Ct - Int	2*min(L,G)
Clase 2	P <sub>21</sub>	P <sub>22</sub>	....	P <sub>2j</sub>	P <sub>2+</sub>	P <sub>2+</sub> - P <sub>22</sub>			
....	....	....	....	....	....	....			
Clase i	P <sub>i1</sub>	P <sub>i2</sub>	....	P <sub>ij</sub>	P <sub>i+</sub>	P <sub>i+</sub> - P <sub>ij</sub>			
<b>Total fecha 2 (P<sub>+j</sub>)</b>	P <sub>+1</sub>	P <sub>+2</sub>	....	P <sub>+j</sub>	<b>I</b>				
<b>Ganancia (G<sub>j</sub>)</b>	P <sub>+1</sub> - P <sub>11</sub>	P <sub>+2</sub> - P <sub>22</sub>	....	P <sub>+j</sub> - P <sub>ij</sub>					

Asimismo, Pontius et al. (2004), mediante una matriz de tabulación cruzada se puede estimar el cambio neto, cambio total y la pérdida y ganancia, como también aquella estimación que ha sufrido el suelo en los diferentes tipos de coberturas. De manera que la Fecha 1 indica las jerarquías de aquellas coberturas que se muestran en el uso del suelo, mientras que la información de la Fecha 2 se muestra en la (Tabla 5). El oblicuo de la Matriz representa las categorías de coberturas y aquellos usos que se dan en el suelo donde no sufrieron las transformaciones durante la transición, donde las demás si sufrieron un cambio a otra categoría.

## 2.6 Predicción de los cambios de Cobertura y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba para los periodos 2022-2052

### 2.6.1 Variables predictoras

Para la predicción a futuro se utilizó el Plugin MOLUSCE (Methods Of Land Use Change Evaluation) uno de los complementos de la Plataforma QGIS. Este Plugin necesita de capas y variables (Figura 4) de entrada para la modelación. Por lo que en la capa de entrada van los mapas del periodo inicial y el periodo final y las variables a utilizar fueron: distancia a la red hídrica, distancia a la red vial, distancia a los principales centros poblados, pendiente, altitud (El-Tantawi et al., 2019; Abbas et al., 2021; Zhang et al., 2022) son las que nos permitirán determinar aquellos posibles cambios a futuro que va sufrir la microcuenca Jucusbamba para los años 2037 y 2052.

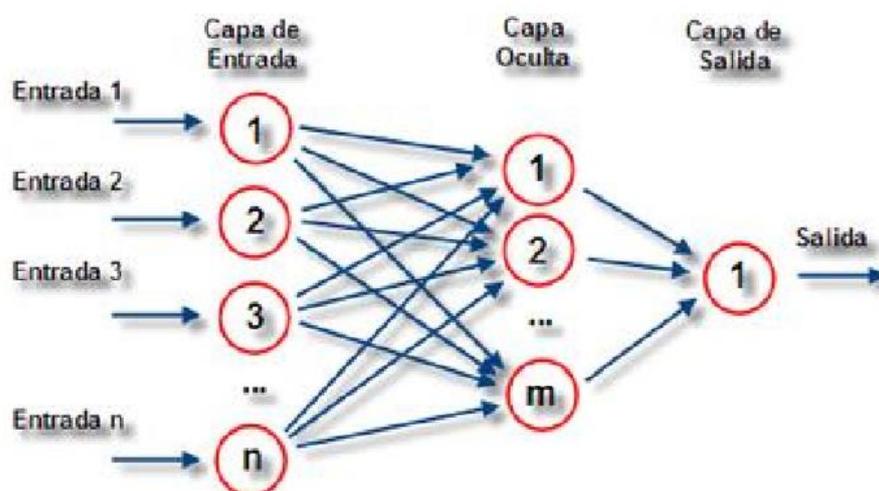


**Figura 4.** Variables predictoras de CCUS para el año 2037 y 2052

### 2.6.2 Predicción y validación al futuro de los cambios de cobertura y usos del suelo CCUS

Molusce Plugin es un complemento de la Plataforma QGIS que realiza modelamiento y simulación lo cual permite obtener mapas donde se simboliza la cobertura de la tierra e identificar aquellos cambios de ocurriendo en el tiempo. Molusce mide el porcentaje de cambio del suelo en un lapso de tiempo y a la vez genera una matriz donde se puede identificar el cambio de un uso de cobertura a otro. Los complementos que utiliza Molusce son la red neuronal artificial (ANN), criterios múltiples de evaluación (MCE), ponderaciones de evidencia (WOE) y métodos de regresión logística (LR) que determinan el modelo de la tierra y el potencial de transición de cobertura (Al-Rubkhi, y Mohammed, s.f.)

La red neuronal artificial (ANN) es un complemento de Molusce Plugin, que a través de las variables de estudio este determina la secuencia temporal, es decir la modelación de espacio-tiempo que podría ocurrir en los cambios de uso del suelo (Díaz-Pacheco y Hewitt, 2014).



**Figura 5.** Funcionamiento de la Red Neuronal Artificial (ANN)

Se utilizó las Autómatas Celulares-Red Neuronal Artificial (CA-ANN) dentro del complemento de MOLUSCE con la finalidad de modelar los potenciales de transición y la simulación a futuro.

Con base de los datos obtenidos de los mapas de 1992 y 2007, las variables predictoras y las matrices de tabulación cruzada (Tabla 5) proyectamos el CCUS al 2022. Molusce te permite validar el modelo y la precisión de la predicción mediante la técnica de validación de Kappa con la comparación de imágenes de CCUS las reales y la proyectada. En este proceso se utilizó 100 interacciones, vecindario 1x1 píxeles, una tasa de aprendizaje 0.001, 12 capas ocultas y 0.001 de impulso para proyectar el CCUS para el 2022. Después de obtener los resultados correctos en la validación del modelo, se utilizó los datos de CCUS 2007 y 2022 para la predicción del CCUS del 2037 y el CCUS 2022 Y 2037 para 2052.

## 2.7 Determinación de la concentración de pérdida de bosques

Para los periodos CCUS de 1992-2007; 2007-2022 y 2022-2037; 2037-2052, se evaluó la concentración de pérdidas de bosques, es decir, el cambio de una cobertura vegetal por la intervención natural o antrópica en el transcurso de los periodos dados y cuanto representa en la superficie de la microcuenca, mediante un análisis de Densidad de Kernel, tomando como base al MINAM (2016b).

### III. RESULTADOS

#### 3.1 Mapas de cambios de la cobertura y usos del suelo (CCUS) en la microcuenca Jucusbamba durante 1992-2022

Los mapas de CCUS de la microcuenca Jucusbamba en los años 1992, 2007 y 2022 se observan en la Figura 7. Estos cambios de cobertura y usos del suelo se aprecian en la Tabla 7. Para el periodo 1992 – 2007, la cobertura de bosque se redujo en - 605.15 ha (representa el 8% de la extensión de 1992, con 40.34 ha/año) y para 2007 - 2022, paso a -1099.4 ha (el 15.8% de la extensión de 2007, con 73.29 ha/año) (Tabla 7). Esta pérdida se ve refleja en la cobertura Mosaico de pastos y cultivos en 1611.35 ha (representa el 70.96% de la extensión de 1992, con 107.42 ha/año) y para el 2022, paso a 3057.78 ha (el 78.76% de la extensión de 2007, con 203.85 ha/año), para el transcurso de los periodos 1992 – 2007 y 2007 – 2022.

**Tabla 7.** Dinámica de los cambios de coberturas y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba en 1992, 2007 y 2022.

Clases CCUS	1992		2007		2022		1992-2007	2007-2022
	ha	%	ha	%	ha	%	Δ %	Δ %
Bosques-BO	7561.32	39.45	6956.17	36.29	5856.77	30.56	-3.16	-5.74
Mosaico de pastos y cultivos-PC	2270.83	11.85	3882.18	20.25	6939.96	36.21	8.41	15.95
Áreas urbanizadas-ZU	25.59	0.13	58.01	0.30	170.77	0.89	0.17	0.59
Vegetación arbustiva /herbácea-AH	9152.65	47.75	8112.08	42.32	6038.01	31.50	-5.43	-10.82
Herbazal/Pajonal-PH	156.92	0.82	158.87	0.83	161.80	0.84	0.01	0.02
<b>Total</b>	<b>19167.31</b>	<b>100.00</b>	<b>19167.31</b>	<b>100.00</b>	<b>19167.31</b>	<b>100.00</b>		

Para la validar el mapa CCUS del 2022 se muestra en el Tabla 8 donde se calculó el número de cada área de referencia de acuerdo a su total de la superficie. En donde la evaluación de la exactitud del mapa actual 2022 se aprecia en la Tabla 9. Mostrando una precisión global (89.8%) y un índice Kappa (0.86%) estos resultados nos indican que hay muy buena concordancia en relación al mapa CCUS y los puntos de las áreas de referencias validadas en campo.

**Tabla 8.** Cálculo de puntos de verificación para el mapa CUS 2022

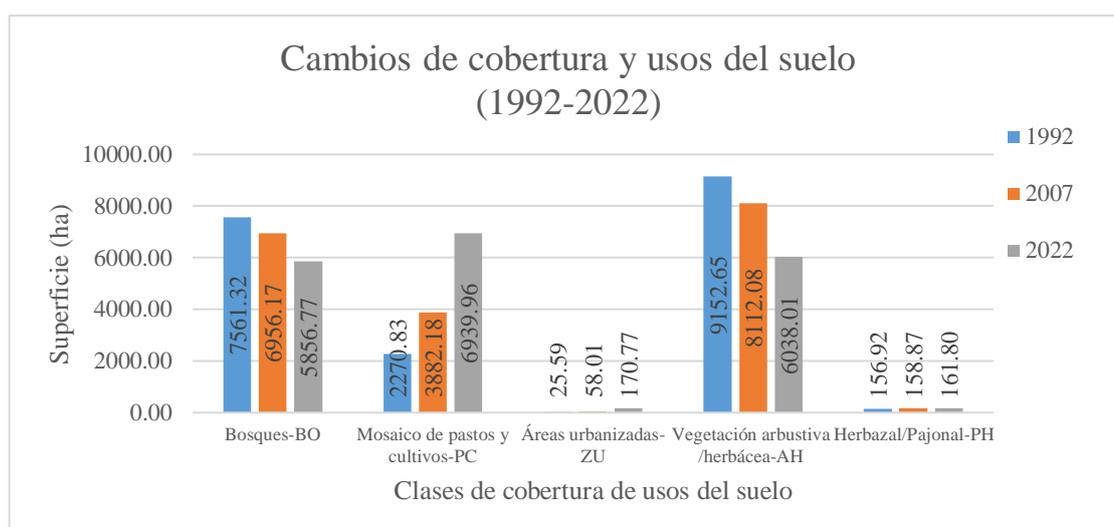
Coberturas y usos del suelo	COD	Área	Área %	Puntos /verificación
Bosques	BO	5856.8	0.31	56
Mosaico de pastos y cultivos	PC	6940.0	0.36	63
Áreas urbanizadas	ZU	170.8	0.01	11
Vegetación arbustiva /herbácea	AH	6038.0	0.32	56

<b>Herbazal/Pajonal</b>	<b>PH</b>	161.8	0.01	10
<b>Total</b>		19167.3	1.00	196

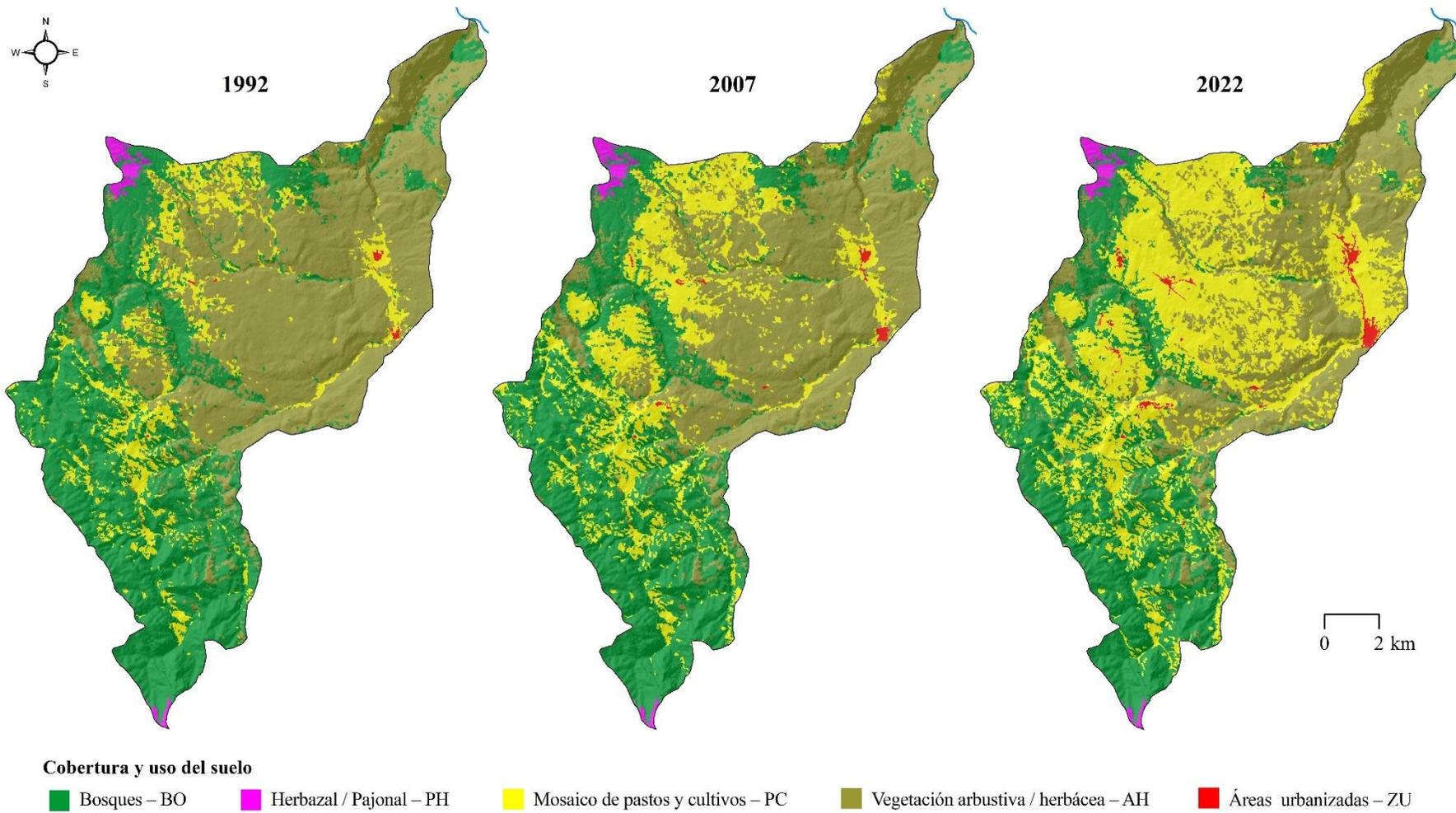
**Tabla 9.** Matriz de confusión para el mapa CUS 2022

Resultados de referencia									
Resultados de clasificación		BO	PC	ZU	AH	PH	Total	Exactitud usuario	Error comisión
	<b>BO</b>	51	4	0	2	0	<b>57</b>	0.89	0.11
	<b>PC</b>	3	58	0	2	0	<b>63</b>	0.92	0.08
	<b>ZU</b>	0	0	11	0	0	<b>11</b>	1.00	0.00
	<b>AH</b>	0	7	0	49	0	<b>56</b>	0.88	0.13
	<b>PH</b>	2	0	0	0	7	<b>9</b>	0.78	0.22
	<b>Total</b>	<b>56</b>	<b>69</b>	<b>11</b>	<b>53</b>	<b>7</b>	<b>196</b>		
	<b>Exactitud productor</b>	0.91	0.84	1.00	0.92	1.00	Exactitud Global = 89.8%		
	<b>Error omisión</b>	0.09	0.16	0.00	0.08	0.00	Índice Kappa = 0.86		

La disminución de la cobertura vegetal, está sujeta a cambios de coberturas y usos del suelo que vienen alterando el diseño del paisaje y el hábitat natural, como es el caso de la microcuenca Jucusbamba. Los periodos de 1992-2007 y 2007-2022 se muestra en la Figura 6, donde la cobertura de Bosques disminuyo en (-3.16%) y (-5.74) y la vegetación arbustiva/herbácea (-5.43% y -10.82%), esto se ve reflejado en el aumento de otras coberturas como Mosaico de pastos y cultivos (8.41% y 15.95%) y las Áreas urbanizadas (0.17% y 0.59%).



**Figura 6** Cambios de coberturas y usos del suelo desde los años 1992 al 2022 en la microcuenca Jucusbamba



**Figura 7.** Coberturas y usos del suelo de la microcuenca Jucusbamba de 1992-2022

En la Figura 8, Tabla 10 y Tabla 11 detallan los cambios de coberturas y usos del suelo entre 1992-2007 y 2007-2022. Donde la oblicua de la matriz determina aquella cobertura que no sufrió cambio en el transcurso del tiempo, las filas y columnas (fecha 1 y 2) son las clases de tipos de cobertura, la intersección de clases nos indica un cambio y a que tipo clase de cobertura paso respectivamente.

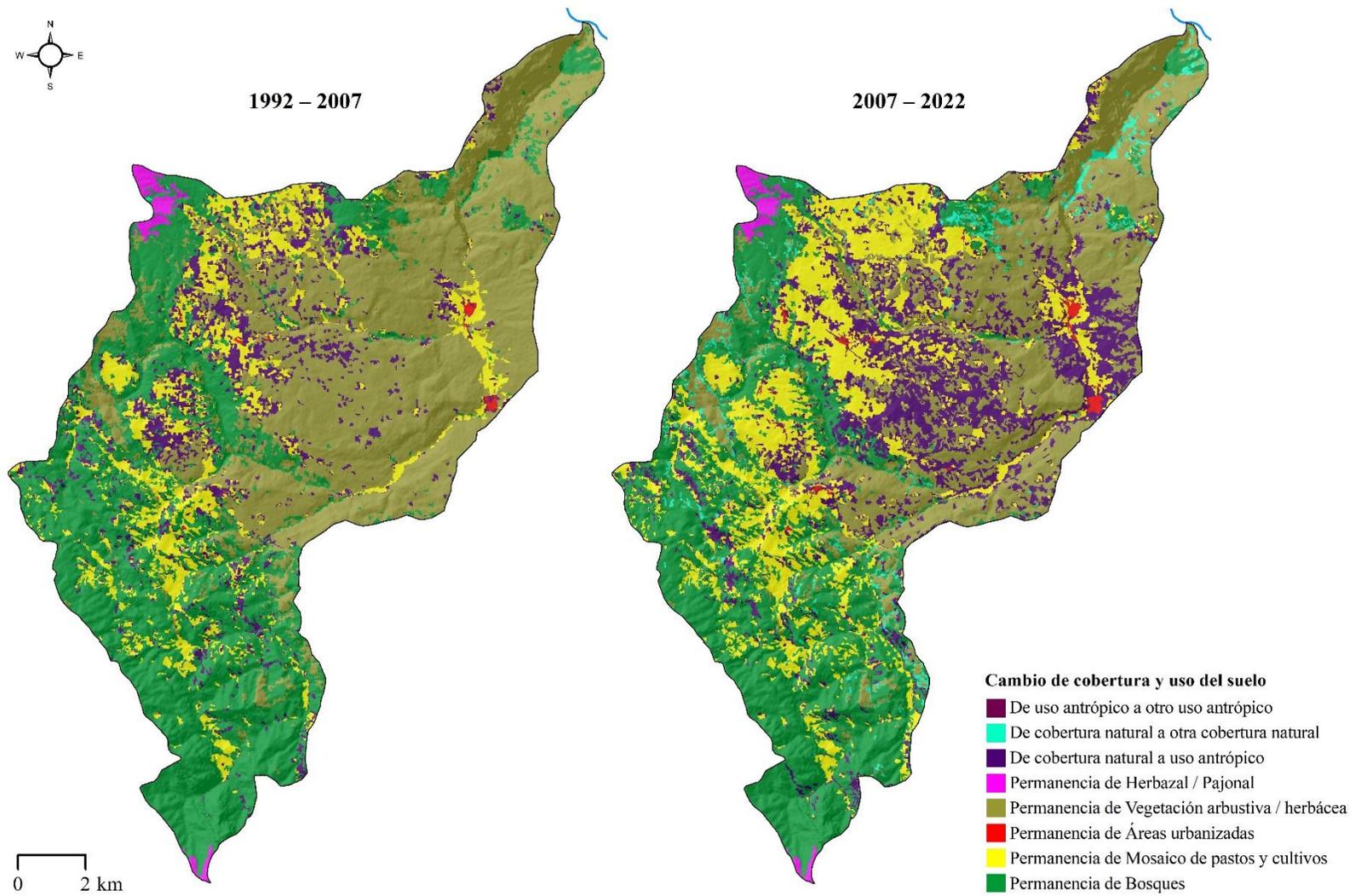
**Tabla 10.** Matriz de tabulación cruzada y tasa de cambio para el periodo de 1992 – 2007

1992	2007					Total 1992	Tasa de cambio	Pérdida (Li)	Cambio total (Ct)	Cambio neto (Cn)	Intercambio (Int)
	BO	PC	ZU	AH	PH						
<b>BO</b>	6956.17	601.97	1.23	0.00	1.95	7561.32	-0.55	8.00	8.00	8.00	0.00
<b>PC</b>	0.00	2246.57	24.257	0.00	0.00	2270.83	3.64	1.07	73.09	70.96	2.14
<b>ZU</b>	0.00	0.00	25.588	0.00	0.00	25.59	5.61	0.00	126.69	126.69	0.00
<b>AH</b>	0.00	1033.63	6.9364	8112.08	0.00	9152.65	-0.80	11.37	11.37	11.37	0.00
<b>PH</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	156.9246	156.92	0.08	0.00	1.24	1.24	0.00
<b>Total 2007</b>	6956.17	3882.18	58.01	8112.08	158.87	<b>19167.31</b>					
<b>Ganancia (Gj) (%)</b>	0.00	72.03	126.69	0.00	1.24						

**Tabla 11.** Matriz de tabulación cruzada y tasa de cambio para el periodo de 2007 – 2022

2007	2022					Total 2007	Tasa de cambio	Pérdida (Li)	Cambio total (Ct)	Cambio neto (Cn)	Intercambio (Int)
	BO	PC	ZU	AH	PH						
<b>BO</b>	5856.8	651.8	0.4	444.3	2.9	6956.17	-1.14	15.80	15.80	15.80	0.00
<b>PC</b>	0	3808.2	74.0	0	0	3882.18	3.95	1.91	82.58	78.76	3.81
<b>ZU</b>	0	0	58.0	0	0	58.01	7.46	0.00	194.40	194.39	0.01
<b>AH</b>	0	2480.0	38.3	5593.7	0	8112.08	-1.95	31.04	36.52	25.57	10.95
<b>PH</b>	0	0	0	0	158.9	158.87	0.12	0.00	1.84	1.84	0.00
<b>Total 2022</b>	5856.77	6939.96	170.77	6038.01	161.80	<b>19167.31</b>					
<b>Ganancia (Gj) (%)</b>	0.00	80.67	194.39	5.48	1.84						

Asimismo, la tasa deforestación fue mayor en el periodo 2007-2022 (1.14%) en comparación con el periodo 1992-2007 (0.55%). Los bosques y la vegetación arbustiva/herbácea se convirtieron en Mosaico de pastos y cultivos para ambos periodos.



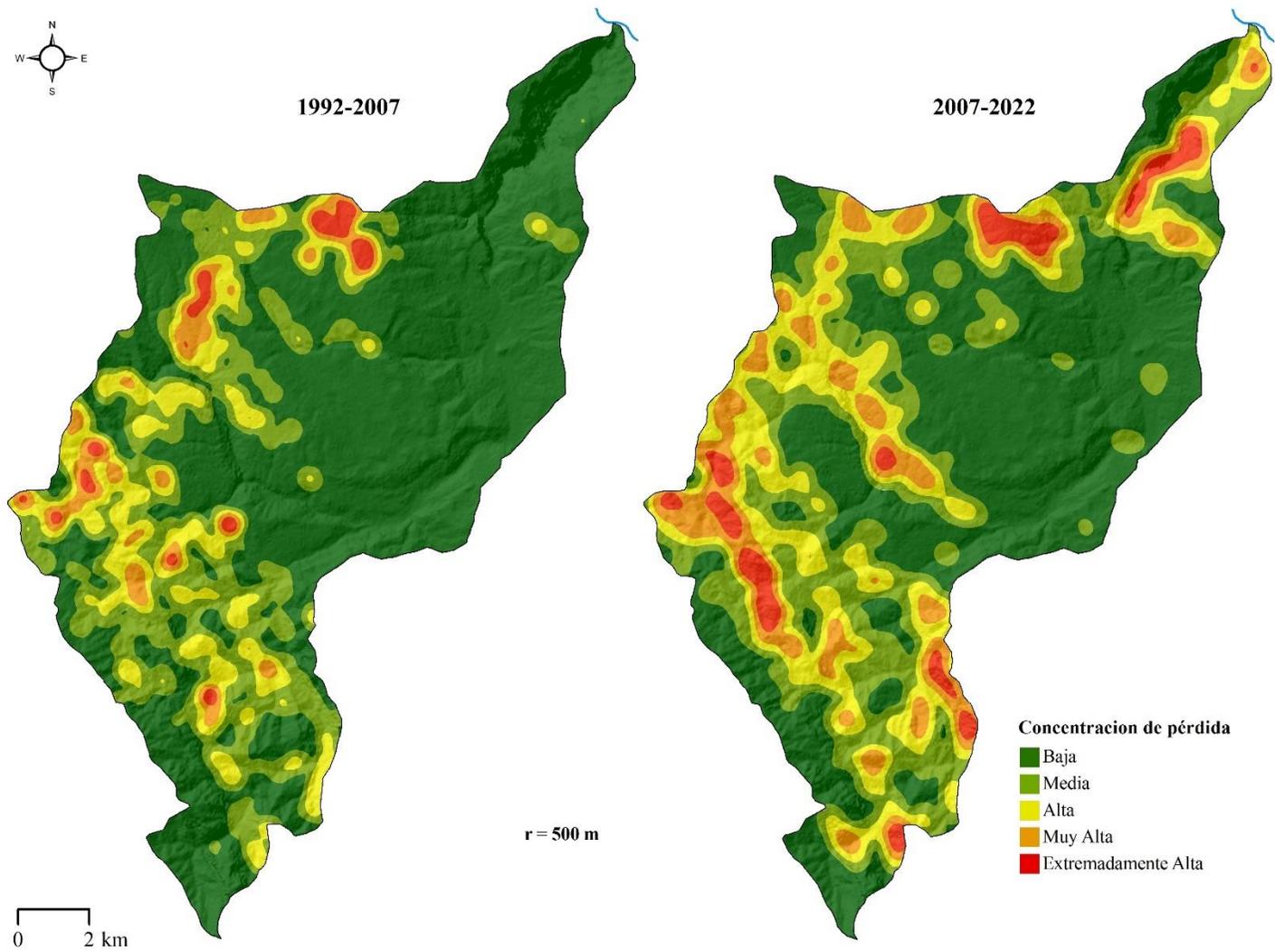
**Figura 8.** Cambios de las coberturas y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba durante 1992 – 2022.

### 3.2 Concentración de pérdida de bosque en la microcuena Jucusbamba en los periodos 1992-2022

La pérdida de bosques se muestra en la Figura 9 y se categorizo en 5 clases de concentraciones Tabla 10. Por lo que el Área no Acumulada es la superficie de cada uno de los tipos de concentraciones, donde la concentración Baja ocupa el (63.33%, del periodo 1992-2007 y 45.58%, del 2007-2022) son áreas de superficies mayores respecto a la concentración Extremadamente alta (1.38%, del periodo 1992-2007 y 3.93%, del 2007-2022). Asimismo el Área Acumulada es la superficie y porcentaje de la suma de cada uno de las concentraciones, donde la concentración Extremadamente alta ocupan superficies menores al 4%.

**Tabla 12.** Pérdida de la superficie de bosques concentración/año en la microcuena Jucusbamba en los periodos 1992-2022

<b>Perdida Bosques/ ha</b>	<b>Concentración/año</b>	<b>1992-2007</b>	<b>2007-2022</b>
<b>Área no acumulada</b>	Baja	12137.84	8737.13
	Media	4019.28	4605.03
	Alta	2024.23	3193.36
	Muy alta	721.04	1878.31
	Extremadamente alta	264.89	753.46
	<b>Total</b>	<b>19167.28</b>	<b>19167.28</b>
	Baja	63.33%	45.58%
	Media	20.97%	24.03%
	Alta	10.56%	16.66%
	Muy alta	3.76%	9.80%
	Extremadamente alta	1.38%	3.93%
<b>Total</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>	
<b>Área acumulada</b>	Baja	19167.28	19167.28
	Media	7029.44	10430.15
	Alta	3010.16	5825.12
	Muy alta	985.93	2631.77
	Extremadamente alta	264.89	753.46
	Baja	100.00%	100.00%
	Media	36.67%	54.42%
	Alta	15.70%	30.39%
	Muy alta	5.14%	13.73%
	Extremadamente alta	1.38%	3.93%



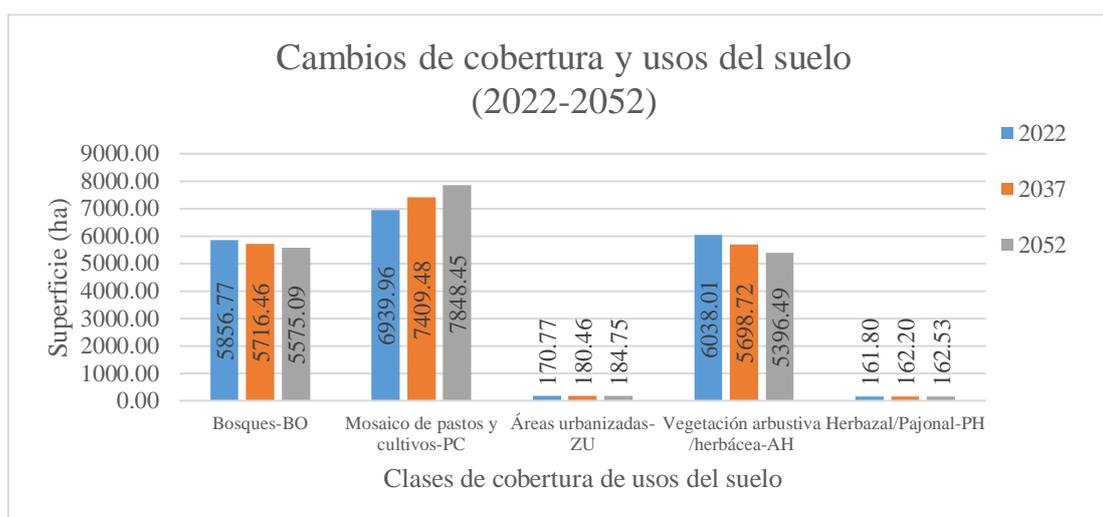
**Figura 9.** Concentración de la pérdida de bosques en la microcuenca Jucusbamba en los periodos 1992-2022

### 3.3 Mapas de cambios de la cobertura y usos del suelo (CCUS) en la microcuenca Jucusbamba durante 2022-2052

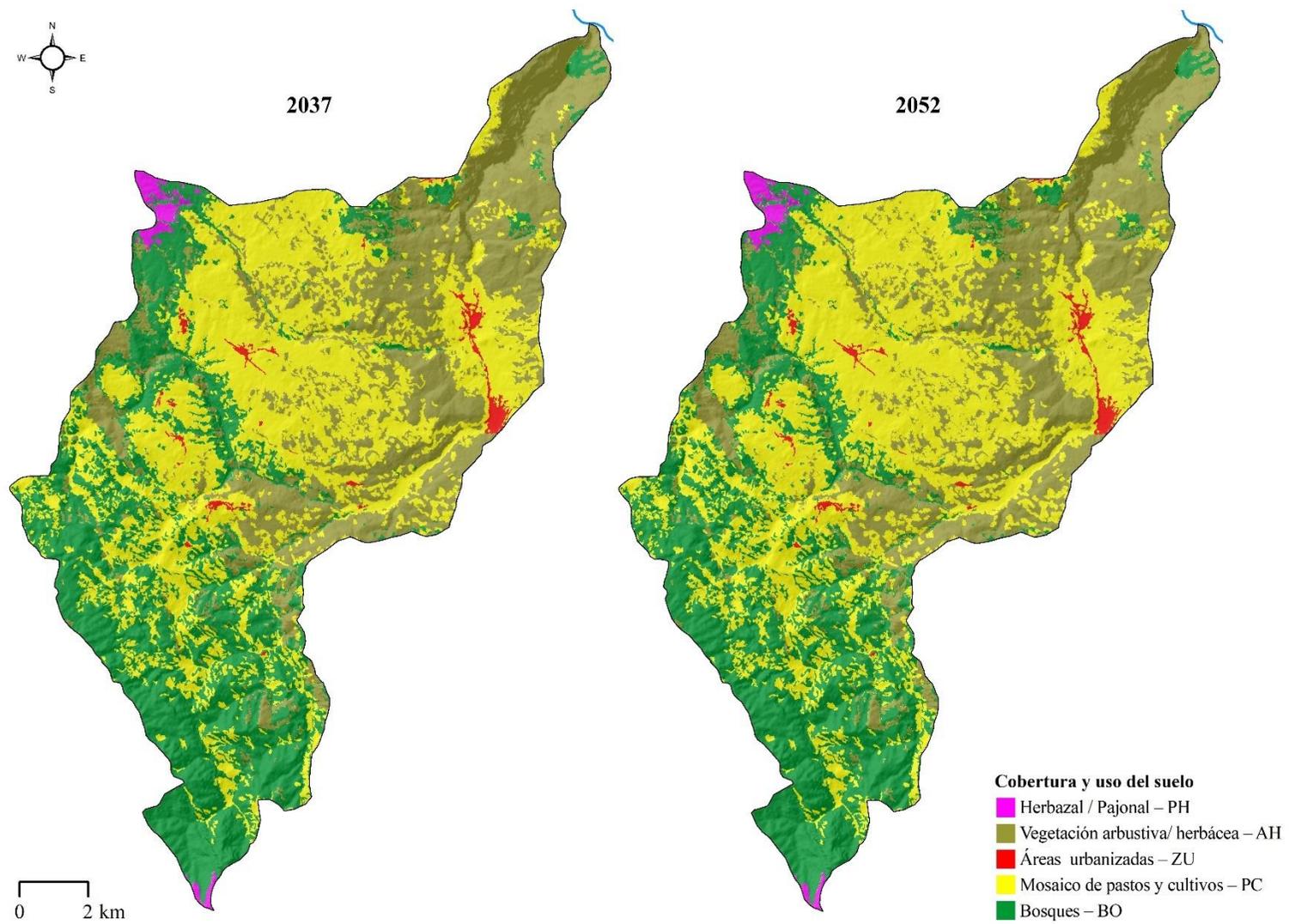
Los mapas simulados de CCUS de la microcuenca Jucusbamba en los años 2037 y 2052 se observan en la Figura 11. Estos cambios de cobertura y usos del suelo se aprecian en la Tabla 13. Para el periodo 2022 – 2037, la cobertura de bosque se redujo en -140.32 ha (representa el 2.4% de la extensión de 2022, con 9.35 ha/año) y para 2037 - 2052, paso a -141.364 ha (el 2.5% de la extensión de 2022, con 9.42 ha/año) (Tabla 9). Esta pérdida se ve refleja en la cobertura Mosaico de pastos y cultivos en 469.52 ha (representa el 6.77% de la extensión de 2022, con 31.30 ha/año) y para el 2052, paso a 438.97 ha (el 5.92% de la extensión de 2037, con 29.23 ha/año), para el transcurso de los periodos 2022 – 2037 y 2037 – 2052 en la Figura 10.

**Tabla 13.** Dinámica de los cambios de coberturas y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba en 2022, 2037 y 2052.

Clases CCUS	2022		2037		2052		2022-2037	2037-2052
	ha	%	ha	%	ha	%	Δ %	Δ %
Bosques-BO	5856.77	30.56	5716.46	29.82	5575.094	29.09	-0.73	-0.74
Mosaico de pastos y cultivos-PC	6939.96	36.21	7409.48	38.66	7848.449	40.95	2.45	2.29
Áreas urbanizadas-ZU	170.77	0.89	180.46	0.94	184.75	0.96	0.05	0.02
Vegetación arbustiva /herbácea-AH	6038.01	31.50	5698.72	29.73	5396.49	28.15	-1.77	-1.58
Herbazal/Pajonal-PH	161.80	0.84	162.20	0.85	162.53	0.85	0.00	0.00
<b>Total</b>	<b>19167.31</b>	<b>100.0</b>	<b>19167.31</b>	<b>100.0</b>	<b>19167.31</b>	<b>100.0</b>		



**Figura 10** Cambios de coberturas y usos del suelo desde los años 1992 al 2022 en la microcuenca Jucusbamba



**Figura 11.** Coberturas y usos del suelo de la microcuenca Jucusbamba del 2037-2052

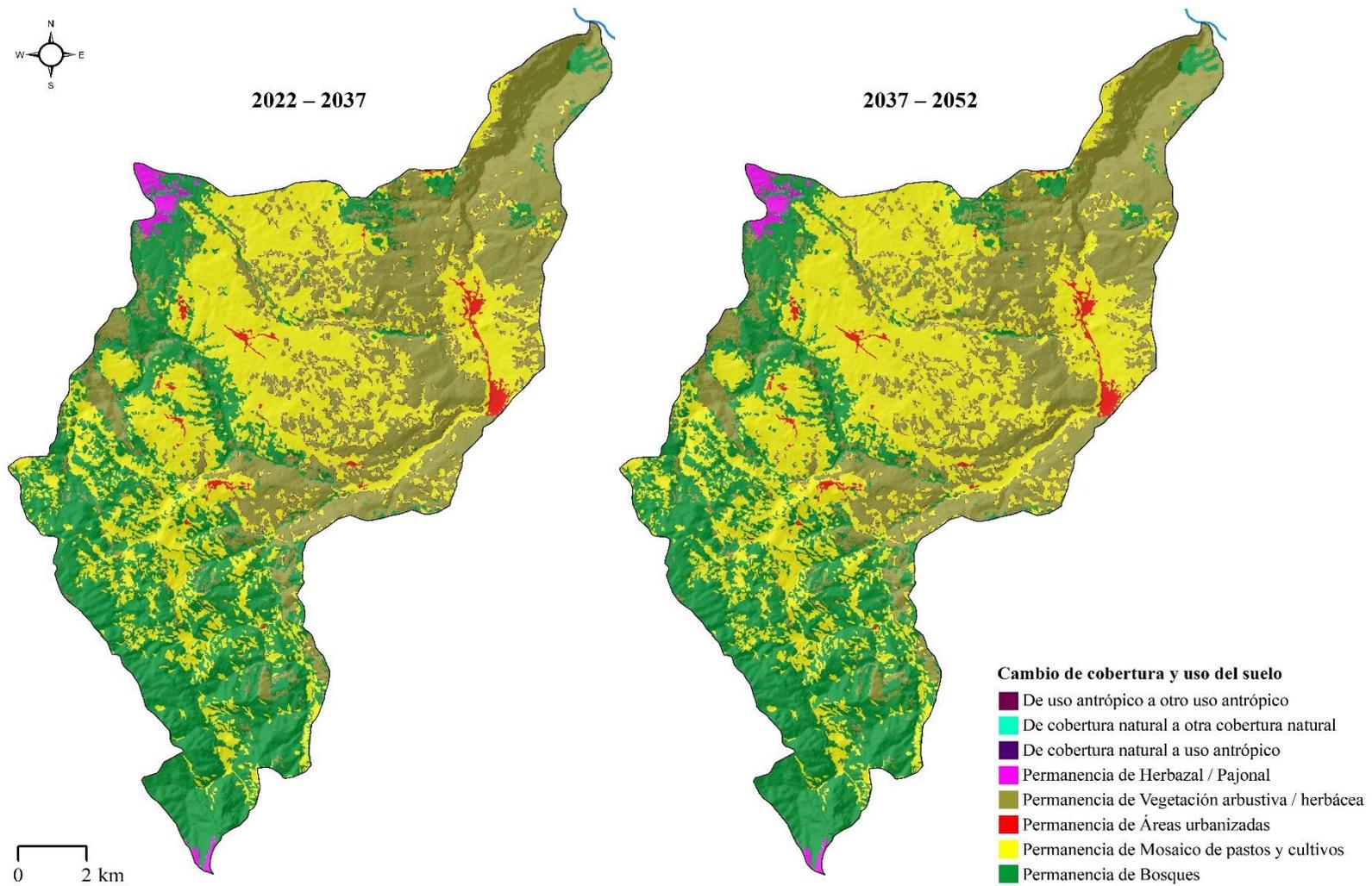
La Figura 12, Tabla 14 y Tabla 15 detallan los cambios de coberturas y usos del suelo entre 2022-2037 y 2037-2052. Donde la tasa deforestación fue mayor en el periodo 2037-2052 (0.17%) en comparación con el periodo 2022-2037 (0.16%). Los bosques y la vegetación arbustiva/herbácea se convirtieron en Mosaico de pastos de y cultivos para ambos periodos. Asimismo, las Áreas urbanizadas tendrán una tasa de crecimiento de 0.37 % entre 2022-2037 y 0.16% entre 2037-2052.

**Tabla 14.** Matriz de tabulación cruzada y tasa de cambio para el periodo de 2022 – 2037

2022	2037					Total 2022	Tasa de cambio	Pérdida (Li)	Cambio total (Ct)	Cambio neto (Cn)	Intercambio (Int)
	BO	PC	ZU	AH	PH						
<b>BO</b>	5716.5	94.5	0.2	42.2	3.4	5856.77	-0.16	2.40	2.40	2.40	0.00
<b>PC</b>	0	6890.9	9.3	39.7	0	6939.96	0.44	0.71	8.18	6.77	1.41
<b>ZU</b>	0	0	170.8	0	0	170.77	0.37	0.00	5.68	5.68	0.00
<b>AH</b>	0	421.0	0.2	5616.7	0.1	6038.01	-0.38	6.98	8.34	5.62	2.72
<b>PH</b>	0	3.0	0	0.1	158.7	161.80	0.02	1.89	4.02	3.99	0.03
<b>Total 2037</b>	5716.46	7409.4	180.4	5698.7	162.2	<b>19167.31</b>					
<b>Ganancia (Gj) (%)</b>	0.00	7.47	5.68	1.36	2.13						

**Tabla 15.** Matriz de tabulación cruzada y tasa de cambio para el periodo de 2037 – 2052

2037	2052					Total 2037	Tasa de cambio	Pérdida (Li)	Cambio total (Ct)	Cambio neto (Cn)	Intercambio (Int)
	BO	PC	ZU	AH	PH						
<b>BO</b>	5575.1	120.3	0.2	19.4	1.6	5716.46	-0.17	2.47	2.47	2.47	0.00
<b>PC</b>	0	7404.6	4.0	0.8	0.1	7409.48	0.38	0.07	6.06	5.92	0.13
<b>ZU</b>	0	0	180.46	0	0	180.46	0.16	0.00	2.37	2.37	0.00
<b>AH</b>	0	322.3	0.1	5376.3	0	5698.72	-0.36	5.66	6.01	5.30	0.71
<b>PH</b>	0	1.3	0	0	160.9	162.20	0.01	0.80	1.81	1.79	0.03
<b>Total 2052</b>	5575.09	7848.4	184.7	5396.4	162.5	<b>19167.3</b>					
<b>Ganancia (Gj) (%)</b>	0.00	5.99	2.37	0.35	1.01						



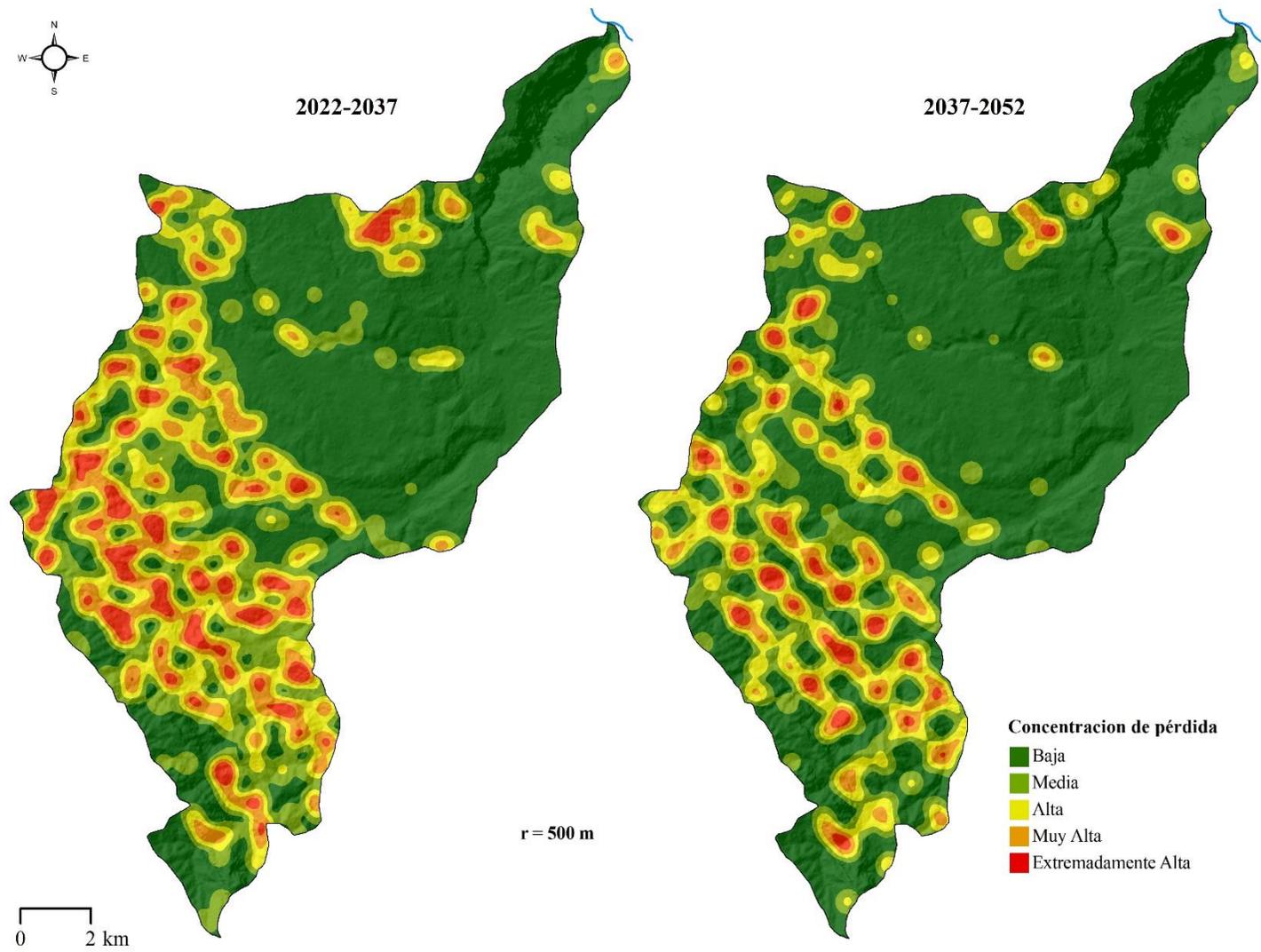
**Figura 12.** Cambios de las coberturas y usos del suelo en la microcuenca Jucusbamba durante 2022 – 2052.

### 3.4 Concentración de pérdida de bosque en la microcuenca Jucusbamba en los periodos 2022-2052

La pérdida de bosques se muestra en la Figura 13 y se categorizo en 5 clases de concentraciones Tabla 16. Por lo que el Área no Acumulada es la superficie de cada uno de los tipos de concentraciones, donde la concentración Baja ocupa el (50.06%, del periodo 2022-2037 y 61.35%, del 2037-2052) son áreas de superficies mayores respecto a la concentración Extremadamente alta (4.68%, del periodo 2022-2037 y 2.34%, del 2037-2052). Asimismo, el Área Acumulada es la superficie y porcentaje de la suma de cada uno de las concentraciones, donde la concentración Extremadamente alta ocupa superficies menores al 4%.

**Tabla 16.** Pérdida de la superficie de bosques concentración/año en la microcuenca Jucusbamba en los periodos 2022-2052

Perdida Bosques/ha	Concentración/año	2022-2037	2037-2052
<b>Área no acumulada</b>	Baja	9594.83	11758.36
	Media	3685.05	3389.22
	Alta	2962.14	2443.66
	Muy alta	2028.16	1127.64
	Extremadamente alta	897.10	448.40
	<b>Total</b>	<b>19167.28</b>	<b>19167.28</b>
	Baja	50.06%	61.35%
	Media	19.23%	17.68%
	Alta	15.45%	12.75%
	Muy alta	10.58%	5.88%
	Extremadamente alta	4.68%	2.34%
	<b>Total</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>
<b>Área acumulada</b>	Baja	19167.28	19167.28
	Media	9572.45	7408.92
	Alta	5887.41	4019.70
	Muy alta	2925.26	1576.04
	Extremadamente alta	897.10	448.40
	Baja	100.00%	100.00%
	Media	49.94%	38.65%
	Alta	30.72%	20.97%
	Muy alta	15.26%	8.22%
	Extremadamente alta	4.68%	2.34%



**Figura 13.** Concentración de pérdida de bosque en la microcuenca Jucusbamba en los periodos 2022-2052

#### IV. DISCUSIÓN

Los principales factores relacionados con el aumento de uso del suelo en las coberturas de Áreas urbanizadas y en Mosaico de pastos y cultivos a expensas del deterioro de la cobertura de Bosques y de la vegetación arbustiva/herbácea pueden atribuirse a la expansión urbana y el crecimiento de la agricultura comercial (Abbas et al., 2021). A su vez, los resultados obtenidos por Osorio et al. (2015) indica que la cobertura de bosques va siendo reemplazada por el aumento de cultivos y pastizales. En la microcuenca Jucusbamba se encontró que los Bosques-BO, Mosaico de pastos y cultivos-PC y Vegetación arbustiva/herbácea-AH son los principales tipos de uso del suelo que predominan.

Por otro lado, la deforestación se ve reflejada en la actividad antrópica que va de la mano con la agricultura migratoria y la ganadería (FAO y SERFOR,2017; Reátegui y Martínez, 2017). Asimismo, la región Amazonas se ve reflejada en la producción agropecuaria según la ZEE de Amazonas los distritos de Chachapoyas y Luya son grandes productores de papa, en el 2005 se estimó una producción de 50 toneladas métricas anuales, en el 2022 la producción de papa aumento en un 8,27% debido a los suelos húmedos (INEI,2022).

Esto se aprecia en la microcuenca Jucusbamba donde la mayor parte de la deforestación está ubicada en altitudes que oscilan los 2400 a 3400 m.s.n.m, donde la cobertura de Mosaico de pastos y cultivos en 1992 representaba el 11.85% de la superficie de la microcuenca, en el 2022 el 36.21% y para el año 2052 al 40.95 %.

Asimismo, la concentración de la pérdida de la cobertura vegetal se presencia con mayor detalle en las zonas de color rojo, son áreas de pérdidas de bosques extremadamente alta y se observan en los mapas de Kernel (MINAM, 2016b). Los resultados obtenidos indican que las zonas de color rojo en el periodo de 1992 - 2007 ocupaban 264.89 ha, en 2007-2022 ascendió a 753.46 ha de áreas acumuladas. Del mismo modo, Briceño et al., (2019) indica que el área acumulada por las zonas de color rojo en los periodos 1987-2001 y 2001-2016 oscilan de 112.18 ha a 277.75 ha.

La degradación de la cobertura del suelo es generada por el aumento de la población a consecuencia de la perdida de esta para el desarrollo de las actividades antropogénicas (Valera et al., 2011). Asimismo, los factores que impulsan la expansión urbana son los

aspectos físicos, sociales, topografía y el aumento de la población debido al crecimiento económico (Yin et al., 2011; Guangjin et al., 2016).

Además, los resultados obtenidos en la clasificación en los periodos de 1992 al 2020 las Áreas urbanizadas aumentaron un 0.76% significativamente. Por otro lado, la predicción futura muestra que la superficie de Bosques disminuyera para el periodo 2037 un 29.82% y para 2052 en 29.09% y las Áreas urbanizadas seguirán aumentando en 0.94% y 0.96% para 2037 y 2052 de la superficie total. En última instancia este crecimiento urbano y la fragmentación de la Bosques ponen en peligro el equilibrio ecosistémico de flora y fauna.

Por lo tanto, los resultados de la predicción ayudaran a intervenir la administración de los recursos naturales como la reutilización de áreas utilizadas para la agricultura migratoria. Por consiguiente, se recomienda la restauración de suelos, tal como evaluaron el grado de restauración y el potencial de restauración de los ecosistemas de las cabeceras de tres ríos en Meseta Qinghai-Tíbet en China, donde los proyectos ecológicos deben de llevarse a cabo en montañas y colinas para la restauración de la vegetación degradada y tomar medidas de conservación del suelo (Liu et al., 2023). Por otro lado, se recomienda escenarios de reforestación en coberturas de pastizales y arbustales (Torres-Rodríguez et al.,2019).

## V. CONCLUSIONES

- Se clasificaron 5 tipos de coberturas y usos del suelo en un intervalo de tiempo de quince años desde 1992,2007,2022,2037 y 2052 para la microcuenca Jucusbamba: Áreas urbanizadas (ZU); Mosaico de Pastos y Cultivos (PC); Bosques (BO); Herbazal / Pajonal (PH) y Vegetación arbustiva / herbácea (AH).
- Se obtuvo un índice global y kappa (k) en la clasificación del mapa CCUS para el año 2022 de 89.8% y 0.86% esto indica que hay muy buena concordancia en la clasificación respecto a las áreas de verificación.
- En la clasificación CCUS, el algoritmo Random Forest demostró representaciones precisas de los cambios de coberturas y las tendencias relacionadas a ella. Según los resultados obtenidos de los mapas clasificados donde el Mosaico de pastos y cultivos experimentaron un crecimiento rápido del 11.85% en 1992 al 36.21% en 2022. En 1992 el 39.45% de Bosques representaba la superficie total mientras que en el 2022 se redujo a 30.56%, asimismo la cobertura de vegetación arbustiva/herbácea tuvo una pérdida significativa en 2022 su superficie era de 31.50% respecto a 1992 donde tenía el 47.75%. El factor impulsor del cambio de uso de la cobertura de la microcuenca Jucusbamba se atribuye a la urbanización y la agricultura migratoria.
- El índice de kernel plasmados en los mapas de concentración de pérdida es una herramienta que te permite identificar donde se encuentra el foco de baja y alta deforestación respecto a la superficie del área evaluada.
- Los mapas simulados por Molusce Plugin y su algoritmo ANN de 2037 y 2052 también predijeron el aumento de la cobertura Áreas urbanizadas y Mosaico de pastos y cultivos, al mismo tiempo la disminución de la cobertura de Bosques. Los recursos naturales se ven comprometidos por estos cambios CUS, particularmente por la fragmentación de la cobertura vegetal. En consecuencia, los resultados obtenidos de la simulación permitirán al usuario tomar medidas de control de la administración de las coberturas del suelo, como también las decisiones al analizar los cambios de intensidad de cada tipo de cobertura y promover planes de desarrollo sostenible y la conservación ambiental.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, Z., Yang, G., Zhong, Y., & Zhao, Y. (2021). Spatiotemporal Change Analysis and Future Scenario of LULC Using the CA-ANN Approach: A Case Study of the Greater Bay Area, China. *Land*, 10(6), 584
- Ali, U., Esau, T. J., Farooque, A. A., Zaman, Q. U., Abbas, F., & Bilodeau, M. F. (2022). Limiting the Collection of Ground Truth Data for Land Use and Land Cover Maps with Machine Learning Algorithms. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(6), 333.
- Al-Rubkhi, A., Talal, A. y Mohammed, A. (s.f.). Land Use Change Analysis and Modeling Using Open Source (QGIS) Case Study: Boasher Willayat.
- Ashaolu, E., Olorunfemi, J. y Ifabiyi, I. (2019). Assessing the Spatio-Temporal Pattern of Land Use and Land Cover Changes in Osun Drainage Basin, Nigeria, *Journal of Environmental Geography*, 12(1-2), 41-50. doi: <https://doi.org/10.2478/jengeo-2019-0005>
- Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine learning*, 24(2), 123-140.
- Buğday, E. y Buğday, S. (2019). Modeling and simulating land use/cover change using artificial neural network from remotely sensing data. *Cerne*, 25(2), 246-254.
- Calampa, R., & Yohel, N. (2018). Determinación de la deforestación entre los años 1986 y 2016 mediante técnicas de teledetección y SIG, distrito Sauce-Perú
- Cánovas-García, F., Alonso-Sarría, F., Gomariz-Castillo, F., & Oñate-Valdivieso, F. (2017). Modification of the random forest algorithm to avoid statistical dependence problems when classifying remote sensing imagery. *Computers & Geosciences*, 103, 1-11.
- Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de teledetección*, 10, 1-9.
- Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel, España.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press/Taylor & Francis.
- Chuvieco, E. y Huete, A. (2009). Fundamentals of satellite remote sensing. In *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1201/b18954>

- Di Bella, C. M., Posse, G., Beget, M. E., Fischer, M. D. L. A., Mari, N., & Verón, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas*, 17(3).
- Díaz, R. y Miranda, J. J. (2014). Áreas naturales protegidas en el Perú: efectos sobre la deforestación y su relación con el bienestar de la población amazónica. *Amazonía peruana y desarrollo económico*, 209-239.
- El-Tantawi, A. M., Bao, A., Chang, C., & Liu, Y. (2019). Monitoring and predicting land use/cover changes in the Aksu-Tarim River Basin, Xinjiang-China (1990–2030). *Environmental monitoring and assessment*, 191(8), 1-18.
- FAO y SERFOR. (2017). Nuestros bosques en números. Primer reporte del Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. Lima: MINAGRI.
- FAO. (1996). Forest Resources Assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Forestry Paper 130. FAO: Roma, Italia.
- FAO. (2015). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015 ¿Cómo están cambiando los bosques del mundo? FAO: Roma, Italia.
- FAO. (2016). El Estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra [Archivo PDF]. <http://www.fao.org/3/a-i5588s.pdf>
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote sensing of environment*, 80(1), 185-201.
- Gislason, P. O., Benediktsson, J. A., & Sveinsson, J. R. (2006). Random forests for land cover classification. *Pattern recognition letters*, 27(4), 294-300.
- Gorelick, N. (2013, April). Google earth engine. In EGU general assembly conference abstracts (Vol. 15, p. 11997). Vienna, Austria: American Geophysical Union.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27.
- GRA e IIAP. (2013). Zonificación Ecológica y Económica (ZEE) de la Región de Amazonas. Iquitos, Perú: Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana.

- Guangjin, T., Xinliang, X., Xiaojuan, L., & Lingqiang, K. (2016). The comparison and modeling of the driving factors of urban expansion for thirty-five big cities in the three regions in China. *Advances in Meteorology*, 2016.
- Gutiérrez, O. (2019). Introducción a las Simulaciones Geomáticas: teoría y práctica. *Las Humanidades En El Mundo Digital / El Mundo Digital En Las Humanidades*, (April), 83–92.
- Jin, Y., Liu, X., Chen, Y., & Liang, X. (2018). Land-cover mapping using Random Forest classification and incorporating NDVI time-series and texture: A case study of central Shandong. *International journal of remote sensing*, 39(23), 8703-8723.
- Liu, G., Shao, Q., Fan, J., Huang, H., Liu, J., & He, J. (2023). Assessment of Restoration Degree and Restoration Potential of Key Ecosystem-Regulating Services in the Three-River Headwaters Region Based on Vegetation Coverage. *Remote Sensing*, 15(2), 523. <https://doi.org/10.3390/rs15020523>
- Martin, R. (2008). Deforestación, cambio de uso de la tierra y REDD. *Unasylva*, 59(230), 3-11
- MINAM. (2009). Mapa de deforestación de la Amazonía Peruana 2000. Memoria Descriptiva. Lima.
- MINAM. (2014b). Informe Final del Proyecto: Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la tierra en la Comunidad Andina. Lima, Perú: MINAM.
- MINAM. (2014b). Protocolo: Evaluación de la Exactitud Temática del Mapa de Deforestación. Lima, Perú: Dirección General de Ordenamiento Territorial
- MINAM. (2014c). Protocolo: Evaluación de la Exactitud Temática del Mapa de Deforestación. Lima, Perú: Dirección General de Ordenamiento Territorial.
- MINAM. (2016b). Mapas kernel como indicador de la concentración de la pérdida de bosques húmedos amazónicos del Perú. Lima, Perú: MINAM.
- Nené-Preciado, A., Sansón, G., Mendoza, M (2017). Cambio de cobertura y uso de suelo en cuencas tropicales costeras del Pacífico central mexicano. *Investigaciones Geograficas*, 2017(94), 64–81. <https://doi.org/10.14350/rig.56770>
- Osorio, L., Mas, J., Guerra, F. y Mas, M. (2015). Análisis y modelación de los procesos de deforestación: un caso de estudio en la cuenca Coyuquilla, Guerrero, México. *Investigaciones geográficas*, (88), 60-74.

- Phan, T. N., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier—The Role of Image Composition. *Remote Sensing*, 12(15), 2411.
- Phan, T. N., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land cover classification using Google Earth Engine and random forest classifier—The role of image composition. *Remote Sensing*, 12(15), 2411.
- Pontius, R. G., Shusas, E. y McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2), 251-268.
- Ramírez, J. (2010). Uso actual de la tierra. Proyecto Zonificación Ecológica y Económica del departamento de Amazonas, convenio entre el IIAP y el GRA. Iquitos, Perú.
- Reátegui, F., & Martínez, P. (2017). Zonificación Ecológica y Económica del Departamento de Amazonas. Forestal. <https://www.geogpsperu.com/2018/02/mapa-forestal-shapefile-memoria.html>
- Rodriguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sanchez, J. P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 67, 93-104.
- Rojas Briceño, N., Barboza Castillo, E., Maicelo Quintana, J., Oliva Cruz, S. y Salas López, R. (2019). Deforestación en la Amazonía peruana: índices de cambios de cobertura y uso del suelo basado en SIG. *Bage*, (81), 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2538a>
- Torres-Rodríguez, S., Díaz-Triana, J. E., Villota, A., & Gómez, W. (2019). Diagnóstico ecológico, formulación e implementación de estrategias para la restauración de un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia). *Caldasia*, 41(1), 42-59.
- Valera Lozano, A., Añó Vidal, C., & Sánchez Díaz, J. (2011). Cincuenta años (1956-2006) de crecimiento urbano y degradación de suelos por sellado antropogénico en el término municipal de Valencia.
- Vargas G., E. (1992). Análisis y clasificación del uso y cobertura de la tierra con interpretación de imágenes. Colombia: IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi).
- Vázquez, P., Zulaica, L. y Requesens, E. (2016). Análisis ambiental de los cambios en el uso de las tierras en el partido de Azul (Buenos Aires, Argentina). *Agriscientia*, 33(1), 15-26

- Velázquez, A., Mas, J., Gallegos, J., Saucedo, R., Alcántara, P., Castro, R. y Palacio, J. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*, (62), 21-37
- Xia, J., Falco, N., Benediktsson, J. A., Du, P., & Chanussot, J. (2017). Hyperspectral image classification with rotation random forest via KPCA. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(4), 1601-1609.
- Yin, J., Yin, Z., Zhong, H., Xu, S., Hu, X., Wang, J., & Wu, J. (2011). Monitoring urban expansion and land use/land cover changes of Shanghai metropolitan area during the transitional economy (1979–2009) in China. *Environmental monitoring and assessment*, 177(1), 609-621.
- Zhang, S., Yang, P., Xia, J., Wang, W., Cai, W., Chen, N., ... & Zhan, C. (2022). Land use/land cover prediction and analysis of the middle reaches of the Yangtze River under different scenarios. *Science of The Total Environment*, 833, 155238

## ANEXOS

**Anexo 1.** Áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada de imágenes de satélite

ID	ESTE	NORTE	CUS
1	174481	9322923	Bosques-BO
1	170455	9323786	Bosques-BO
1	169537	9323459	Bosques-BO
1	169383	9323998	Bosques-BO
1	164175	9324364	Bosques-BO
1	167222	9320922	Bosques-BO
1	170679	9319773	Bosques-BO
1	163630	9321989	Bosques-BO
1	162502	9319131	Bosques-BO
1	162503	9316884	Bosques-BO
1	163163	9316419	Bosques-BO
1	163507	9316139	Bosques-BO
1	163157	9314131	Bosques-BO
1	164380	9314278	Bosques-BO
1	163821	9314749	Bosques-BO
1	161202	9316706	Bosques-BO
1	161060	9313897	Bosques-BO
1	161159	9313953	Bosques-BO
1	162042	9311502	Bosques-BO
1	162095	9311330	Bosques-BO
1	162713	9311002	Bosques-BO
1	162409	9310794	Bosques-BO
1	162736	9310626	Bosques-BO
1	162948	9309902	Bosques-BO
1	162994	9310145	Bosques-BO
1	164005	9308615	Bosques-BO
1	163898	9308498	Bosques-BO
1	164520	9308575	Bosques-BO
1	164705	9307546	Bosques-BO
1	165553	9307320	Bosques-BO
1	165200	9306720	Bosques-BO
1	165383	9306894	Bosques-BO
1	165884	9306769	Bosques-BO
1	166301	9305307	Bosques-BO
1	166200	9305230	Bosques-BO
1	165682	9306186	Bosques-BO
1	168240	9306473	Bosques-BO
1	168211	9306617	Bosques-BO
1	167246	9307528	Bosques-BO

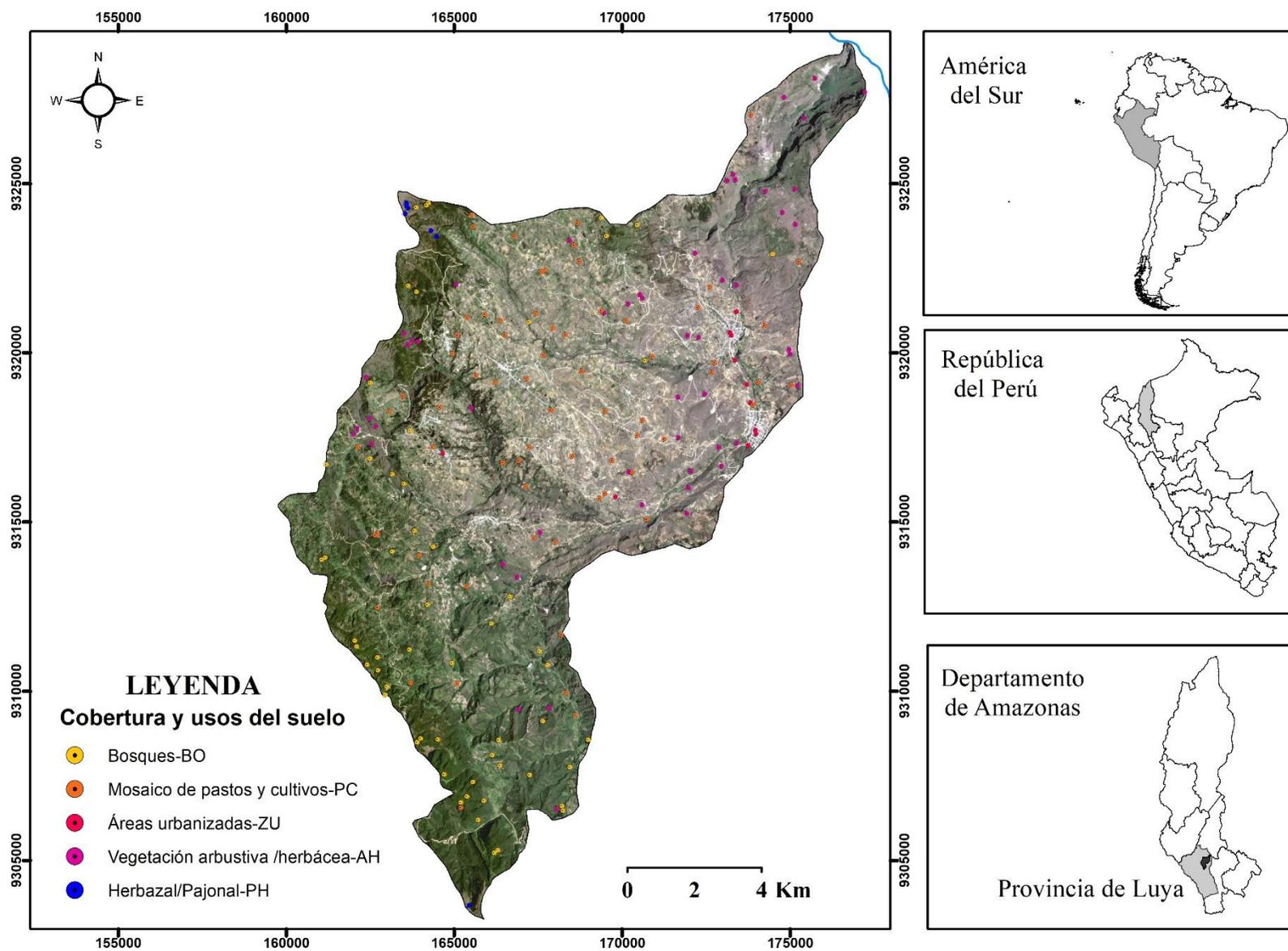
1	166366	9307810	Bosques-BO
1	166133	9308118	Bosques-BO
1	168444	9307760	Bosques-BO
1	168992	9308568	Bosques-BO
1	167640	9309120	Bosques-BO
1	166322	9308566	Bosques-BO
1	164937	9310837	Bosques-BO
1	163664	9311234	Bosques-BO
1	164209	9312564	Bosques-BO
1	166107	9312007	Bosques-BO
1	167538	9311187	Bosques-BO
1	167782	9310780	Bosques-BO
1	166661	9312802	Bosques-BO
1	163696	9317709	Bosques-BO
1	163875	9324302	Bosques-BO
1	164236	9324433	Bosques-BO
1	163880	9321810	Bosques-BO
2	168792	9319464	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	170742	9315079	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	174049	9319137	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	173910	9318469	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	175040	9319055	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	174237	9320808	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	172603	9321960	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	168688	9323842	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	168578	9323187	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	168727	9322707	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	167704	9322459	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	167599	9322398	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	166788	9323441	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	165573	9323729	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	165514	9324082	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	172259	9321344	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	172668	9319427	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	172754	9319716	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	170123	9320939	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	169390	9321250	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	175265	9322699	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	171254	9317459	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	170444	9317561	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	170600	9318006	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	170315	9316471	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	169484	9315845	Mosaico de pastos y cultivos-PC

2	169327	9315703	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	169710	9316813	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	168510	9316951	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	169483	9318281	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	167883	9318313	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	167160	9319241	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	166223	9319137	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	165650	9319342	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	168325	9320539	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	167933	9320739	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	167428	9321157	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	170898	9319898	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	167667	9319937	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	166518	9320536	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	166374	9320964	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	165923	9321142	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	165389	9321051	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	163481	9318721	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	163073	9318272	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	162136	9317220	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	162727	9314663	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	162660	9314615	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	163958	9314020	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	168614	9309307	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	165090	9310232	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	168198	9311673	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	165367	9313104	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	168329	9309956	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	163697	9310253	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	162728	9312472	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	164238	9313180	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	164360	9317223	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	164579	9318398	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	167229	9317219	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	166915	9316809	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	167135	9316055	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	166444	9316762	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	164963	9319980	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	165104	9320530	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	165202	9306562	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	173832	9327031	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	168015	9314402	Mosaico de pastos y cultivos-PC
2	167384	9314533	Mosaico de pastos y cultivos-PC

3	173964	9317721	Áreas urbanizadas-ZU
3	173814	9318533	Áreas urbanizadas-ZU
3	173983	9317606	Áreas urbanizadas-ZU
3	173741	9317266	Áreas urbanizadas-ZU
3	173707	9319071	Áreas urbanizadas-ZU
3	173355	9319789	Áreas urbanizadas-ZU
3	173250	9320521	Áreas urbanizadas-ZU
3	173209	9320604	Áreas urbanizadas-ZU
3	173397	9321222	Áreas urbanizadas-ZU
3	169801	9315754	Áreas urbanizadas-ZU
3	164654	9317034	Áreas urbanizadas-ZU
4	174997	9319972	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	174963	9320098	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	172456	9318790	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	171666	9318692	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	171923	9315255	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	172042	9316501	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	175220	9319033	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	173410	9322009	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	172988	9322155	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	175155	9323801	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	174766	9324156	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	174256	9324783	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	175130	9324848	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	175417	9326932	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	174818	9327555	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	175733	9328112	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	173121	9325092	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	173369	9325119	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	173302	9325274	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	172171	9322949	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	168434	9323317	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	165062	9322023	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	172279	9320461	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	171945	9320516	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	170599	9321621	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	170524	9321728	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	170183	9321452	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	169457	9321186	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	173412	9317335	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	172952	9316661	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	172870	9317210	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	171670	9317501	Vegetación arbustiva /herbácea-AH

4	171973	9316019	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	170595	9315516	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	170203	9316476	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	163935	9320334	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	163743	9320375	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	163626	9320244	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	163512	9320580	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	162380	9319287	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	162496	9318059	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	162665	9317837	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	162546	9317308	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	162018	9317601	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	162117	9317775	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	168077	9306529	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	167827	9309515	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	166912	9309470	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	166866	9313371	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	166460	9313750	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	167553	9314695	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	165516	9318380	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
4	177223	9327710	Vegetación arbustiva /herbácea-AH
5	164307	9323620	Herbazal/Pajonal-PH
5	163622	9324282	Herbazal/Pajonal-PH
5	163585	9324362	Herbazal/Pajonal-PH
5	163573	9324435	Herbazal/Pajonal-PH
5	163539	9324115	Herbazal/Pajonal-PH
5	165444	9303677	Herbazal/Pajonal-PH
5	164479	9323447	Herbazal/Pajonal-PH

## Anexo 2. Sitios de verificación para determinar la exactitud temática de la Clasificación.



**Anexo 3.** Panel Fotográfico de los tipos de coberturas de los CUS

Áreas para entrenamiento de los tipos de CUS en la clasificación supervisada de imágenes de satélite



**Fotografía 1.** Cultivo de papa (MPC)



**Fotografía 3.** Pastos (MPC)



**Fotografía 4.** Bosque (BO)



**Fotografía 5.** Vegetación arbustiva/herbácea (AH)



**Fotografía 6.** Vegetación arbustiva/ herbácea (AH)



**Fotografía 7.** Zona urbana- Centro poblado Luya (ZU)



**Fotografía 8.** Zona urbana-Centro poblado Chocta (ZU)



**Fotografía 11.** Herbazal/pajonal (HP)



**Fotografía 12.** Vista panorámica de Bosque



**Fotografía 13 y 14.** Vista panorámica de Mosaico de pastos (Microcuenca Baja y media Fotografía 13 y la fotografía 14 Microcuenca alta)



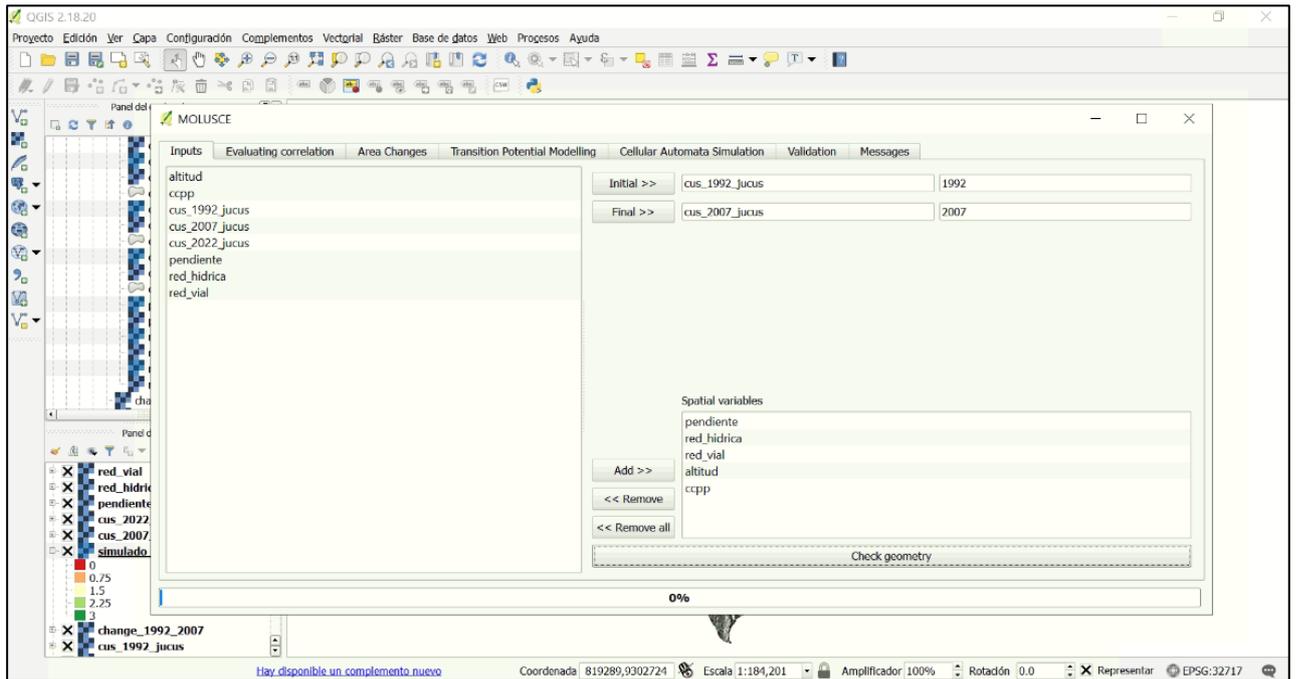


**Fotografía 15,16 y 17.** Vista panorámica de Vegetación arbustiva/herbácea (Microcuenca baja Fotografía 15, Microcuenca media Fotografía 16 y Fotografía 17 Microcuenca Alta)

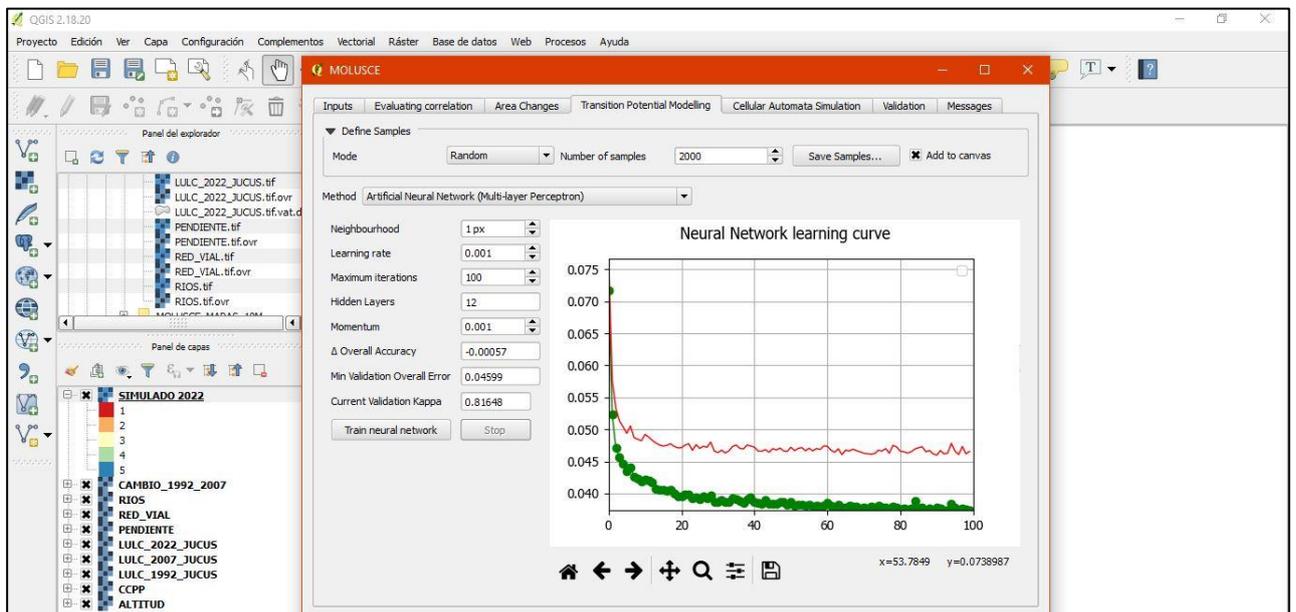


**Fotografía 18.** Vista panorámica de Herbazal/Pajonal.

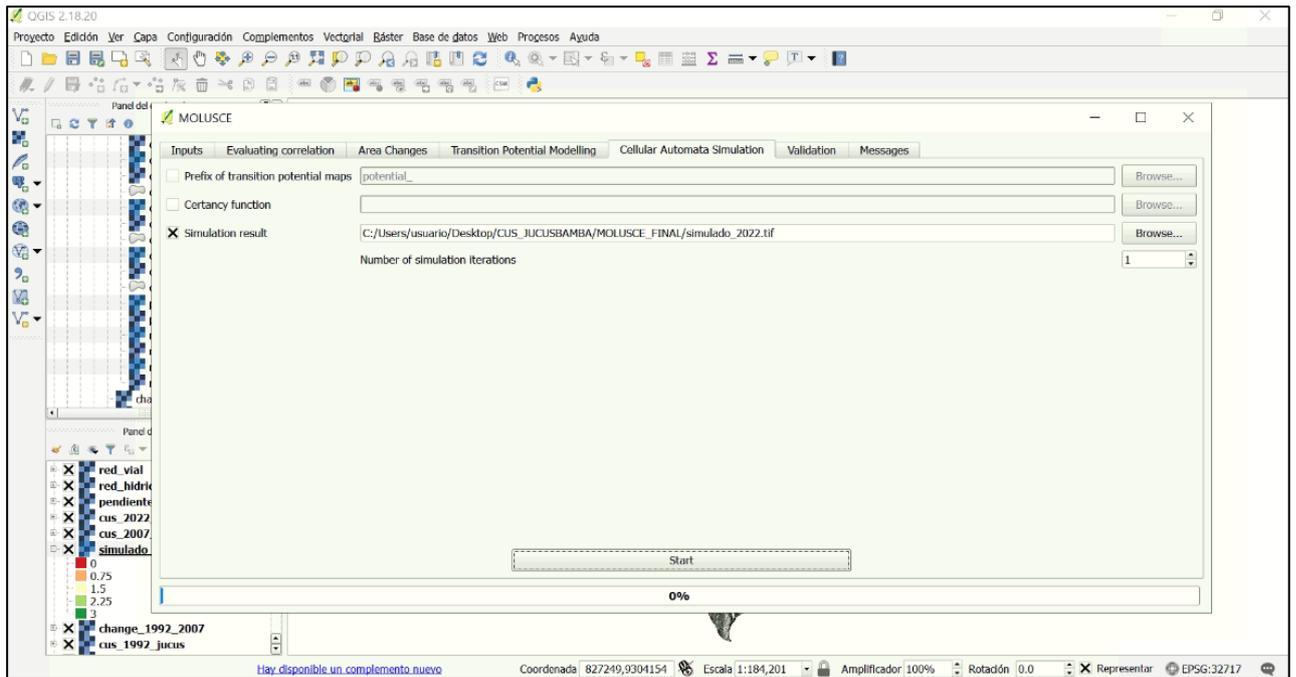
## Anexo 4. Validación y simulación en QGIS con el algoritmo MOLUSCE Plugin



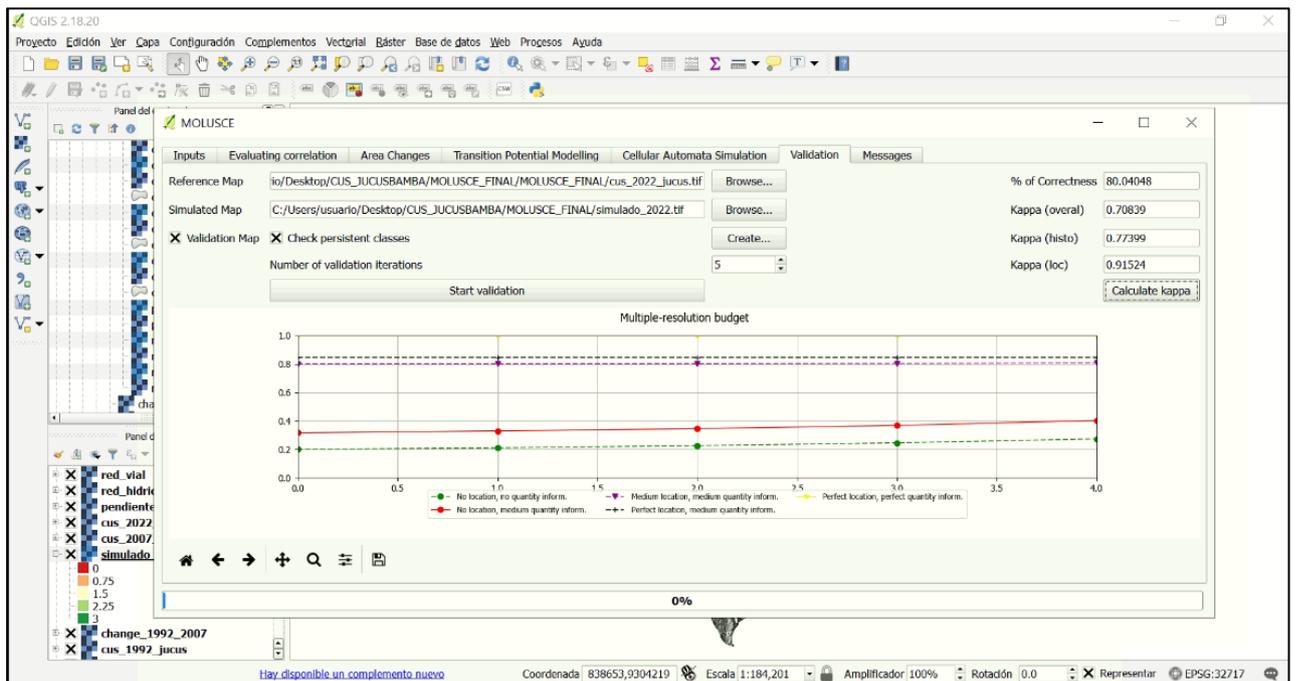
**fotografía 1.** Introducción de un Mapa inicial 1992 +Mapa Final 2007+ Variables para la validación del mapa actual 2022.



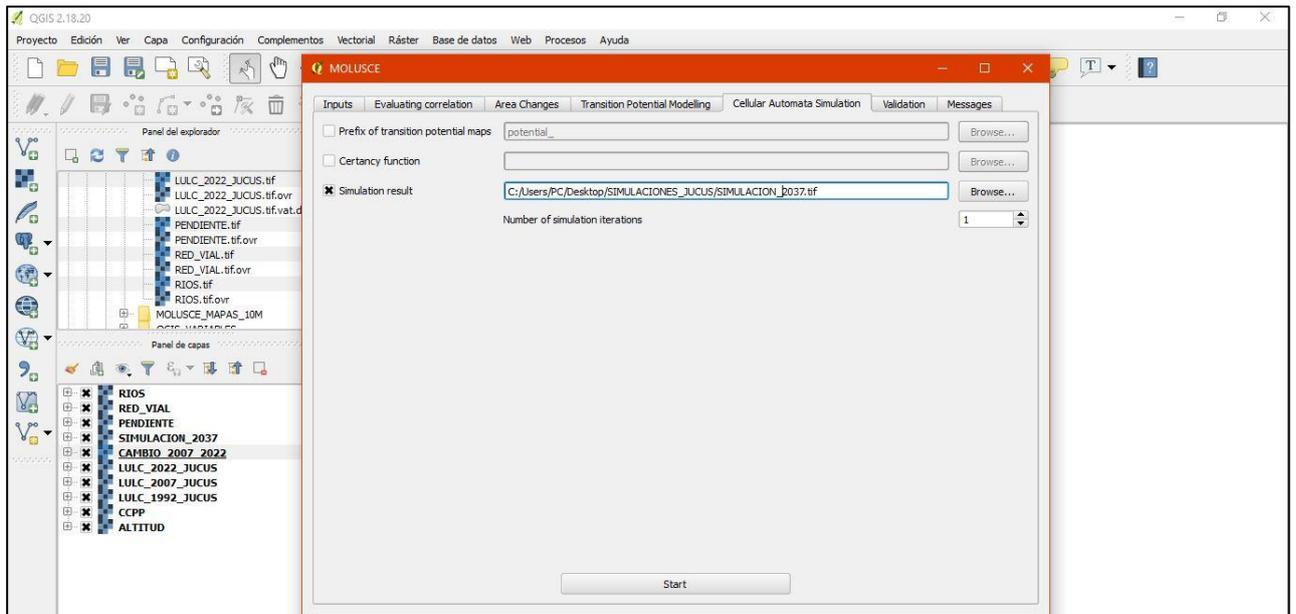
**Fotografía 2.** Interfaz para la simulación del mapa actual para la validación y simulación al 2037



**fotografía 3.** Interfaz de Simulación del mapa CUS para la validación



**Fotografía 4.** Validación del mapa simulado con el actual (Rerefence Map = Mapa de clasificación actual y Simulad Map= Mapa simulado) e índice Kappa a lado superior derecho.



**fotografía 5.** Simulación del mapa CUS para el año 2037 y 2052.