



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA - FACULTAD DE CIENCIAS

Proyecto de grado para optar al Título de Tecnólogo en Cartografía

**Evolución del Bosque Nativo en la
cuenca del río Santa Lucía**

Autores:

David García

María Fernanda Morales

Tutores:

Edison Rosas

Hebenor Bermúdez

Montevideo, Uruguay

2019

FACULTAD DE INGENIERÍA

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba el Proyecto de grado:

Titulo: Evolución del bosque nativo en la cuenca del río Santa Lucía

Autores: David García, María Fernanda Morales

Tutores: Edison Rosas, Hebenor Bermúdez

Carrera: Tecnólogo en Cartografía

Puntaje:

.....

Tribunal

Profesor

.....

Profesor

.....

Profesor

.....

FECHA

.....

AGRADECIMIENTOS

A los tutores Edison Rosas y Hebenor Bermúdez, a Paul Borsy de UNIQUE forestry and land use GmbH y a los técnicos de la Dirección General Forestal.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	vi
Palabras clave	vi
Tabla de cuadros e ilustraciones	vii
Introducción	1
Capítulo 1	3
1.1 Objetivo general.....	3
1.2 Objetivos específicos	3
Capítulo 2	4
2.1 El espectro electromagnético.....	4
2.2 Comportamiento espectral de la vegetación en el espectro óptico	5
2.3 Interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación	6
2.4 Interacción atmósfera-radiación.....	6
2.5 Imágenes satelitales	7
2.6 Teledetección	7
2.7 Características de las imágenes Landsat utilizadas	8
2.8 Fundamentación de la corrección	8
Capítulo 3	11
Diagrama de flujo	11
3.1 Insumos de trabajo	12
3.2 Fase 1: definición del área de estudio	12
3.2.1 Ubicación geográfica del proyecto	12

3.2.2	Descarga de las imágenes desde el USGS	13
3.3	Fase 2 y 3: Identificación del bosque nativo y salida de campo .	14
3.3.1	Identificación del bosque nativo	14
3.3.2	Salida de campo.....	14
3.4	Fase 4: procesamiento de las imágenes	15
3.4.1	Selección de bandas.....	15
3.4.2	Corrección radiométrica	15
3.4.3	Corrección atmosférica	16
3.4.5	Apilado de bandas.....	18
3.4.6	Proceso de clasificación supervisada.....	18
3.4.7	Creación de matriz de confusión.....	19
Capítulo 4	20
4.1	Mapa comparativo multi-temporal.....	20
4.2	Matrices de confusión	23
Conclusiones	25
Bibliografía	30

RESUMEN

Dentro de las variables ambientales que inciden en la conservación de la calidad de los cursos de agua, la preservación del bosque nativo ribereño es una de las más relevantes, ya que cumple la función de regulación hídrica, de preservación de la erosión del suelo y por tanto de barrera para el aporte de sedimentos con una amplia variedad de componentes: fertilizantes, nutrientes, agrotóxicos -entre otros- al curso de agua.

En nuestro país, la cuenca del río Santa Lucía es de suma importancia, no solo por su dimensión -se extiende a lo largo seis departamentos- sino por la gran variedad de funciones ambientales que provee. Sin ir más lejos, de su cauce se extrae el 60% del agua que se utiliza para consumo humano en el país.

En los últimos años se ha detectado un deterioro vertiginoso en la calidad del agua de la cuenca, por lo que se hace necesario realizar un estudio de los diversos factores que lo han causado -el estado de situación del bosque nativo de la cuenca entre ellos-.

Este trabajo pretende realizar un estudio histórico de la evolución que ha tenido la superficie cubierta por bosque nativo dentro de la cuenca y un diagnóstico del estado de situación en el momento actual. Para ello, pretende elaborar y validar una metodología de estudio de cobertura de suelos, -particularmente de bosque nativo- a partir del tratamiento y análisis de imágenes satelitales Landsat.

Se desarrollará una metodología de clasificación de cobertura terrestre a través de los diferentes comportamientos espectrales y se realizará un inventario del bosque nativo en la cuenca entre los años 1984 y 2016, analizando su evolución.

Por último se procurará validar la información obtenida mediante una comparación con otras fuentes de datos.

PALABRAS CLAVE

Bosque nativo, cobertura de suelos, imágenes satelitales, teledetección.

TABLA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Tablas

Tabla 1 - Características de las imágenes Landsat.....	8
Tabla 2 - Inventario de imágenes Landsat utilizadas.....	14
Tabla 3 - Datos base de cálculo de correcciones para el año 2016.....	18
Tabla 4 - Matriz de confusión para el año 1984.....	23
Tabla 5 - Matriz de confusión para el año 2000.....	23
Tabla 6 - Matriz de confusión para el año 2004.....	23
Tabla 7 - Matriz de confusión para el año 2008.....	24
Tabla 8 - Matriz de confusión para el año 2011.....	24
Tabla 9 - Matriz de confusión para el año 2016.....	24
Tabla 10 - Evolución de la superficie de bosque nativo.....	25
Tabla 11 - Precisión de la clasificación según año.....	26
Tabla 12 - Porcentaje de puntos sin clasificar según año.....	26
Tabla 13 - Errores de omisión de nativo en favor de plantado y viceversa.....	27
Tabla 14 - Superficie de bosque nativo según año y fuente (ha).....	28

Ilustraciones

Fig. 1 - Transmisividad atmosférica en función de la longitud de onda.....	7
---	---

Fig. 2 - Esquema de la dispersión atmosférica.....	9
Fig. 3 - Diagrama de flujo del proceso de trabajo.....	11
Fig. 4 - Mapa de sectorización de la cuenca según escenas Landsat.....	12
Fig. 5 - Puntos proyectados y puntos tomados en campo.....	15
Fig. 6 - Mapa comparativo de cobertura bosque nativo 1984 - 2016.....	20
Fig. 7 - Mapa multi-temporal de cobertura bosque nativo 1984 - 2016.....	21
Fig. 8 - Mapa multi-temporal de cobertura del suelo 1984 - 2016.....	22
Fig. 9 - Evolución de la superficie de bosque nativo 1984 - 2016.....	25
Fig. 10 - Mapa comparativo cobertura bosque nativo con LCCS.....	29

INTRODUCCIÓN

A consecuencia del deterioro vertiginoso que se ha registrado en los últimos años en la calidad del agua del río Santa Lucía, de donde extrae la planta potabilizadora de OSE (Obras Sanitarias del Estado) que abastece de agua potable al 60% de la población del Uruguay, se hace necesario un estudio de las variables ambientales y antrópicas que han tenido incidencia en este cambio.

Dentro de las variables ambientales que influyen en este proceso, la cobertura de bosque nativo en la cuenca es una de las más relevantes, ya que cumple con la función de regulación hídrica, que a su vez se relaciona directamente con el control de la erosión del suelo, elementos que influyen directamente en la calidad del agua de los cursos. Por lo cual, la realización de un estudio histórico de la evolución que ha tenido la superficie cubierta por bosque nativo dentro de la cuenca y un diagnóstico del estado de situación en el momento actual, permitiría generar insumos de trabajo específicos respecto a esta problemática.

Para este trabajo los insumos utilizados fueron: imágenes satelitales Landsat 5 (1984-2011) y Landsat 8 (2016), obtenidas del *United State Geological Survey* (USGS); archivos *shape file* de: delimitación de cuenca del río Santa Lucía (FCIEN), hidrografía y departamentos (MTOPE), cobertura de suelos LCCS (DINOT), carta forestal 2012 (DGF, MGAP); bases de datos de puntos de campo de cobertura de suelos (DGF) y registro de bosques (DGF).

Para la descarga de las imágenes en cada año de estudio, se consideró el período octubre-diciembre procurando utilizar los niveles más altos de clorofila, humedad y vigorosidad que presenta la vegetación en el período primavera-verano, con el fin de obtener una mejor clasificación.

De las bandas componentes de las imágenes satelitales se utilizaron para este trabajo: rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio, a las que se le realizó la corrección atmosférica y se hizo la conversión a niveles de reflectancia según Método de objeto oscuro de Chávez.

Una vez finalizadas las correcciones y conversión se apilaron las bandas, se elaboró el mosaico y se recortó según el área de estudio.

Posteriormente, se definen las clases para la clasificación, supervisada y no supervisada, utilizando muestras de campo (datos históricos pertenecientes a la base de datos de la Dirección General Forestal) y muestras actuales a partir de salidas de campo realizadas en el marco de este proyecto.

Para la validación y control de calidad de la clasificación, se elaboran matrices de confusión mediante puntos de control.

Por último, se creó una base de datos geográficos con la información relativa a la superficie cubierta por bosque nativo en cada año, se realizó un análisis de la evolución de dicha superficie para el período de estudio y un análisis comparativo de la información obtenida con otras fuentes de datos (DGF, LCCS) para las fechas donde hay coincidencia.

CAPITULO 1

OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Determinar la dinámica de cambio del bosque nativo en la cuenca del río Santa Lucía, utilizando imágenes satelitales Landsat 5 y 8.

1.2 Objetivos específicos

- Relevamiento del bosque nativo en la cuenca del río Santa Lucía, mediante el uso de imágenes Landsat entre los años 1984 y 2016.
- Análisis de la evolución de la superficie de bosque nativo entre esos años, tomando como base el año 1984 y en intervalos periódicos en el período 2000 – 2016.
- Estudio del comportamiento espectral de este tipo de cobertura en imágenes Landsat.
- Comparación y validación (de ser posible) de los datos obtenidos con otras fuentes: Atlas de Cobertura del Suelo de Uruguay LCCS (FAO/DINOT), Inventario Forestal (DGF).

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 El espectro electromagnético

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético. Las características de este flujo de energía puede describirse por dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (ν). Donde la longitud de onda hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda y la frecuencia determina el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo.

Ambos elementos están inversamente relacionados:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad [1]$$

Con esta ecuación y la de energía radiante de un fotón:

$$Q = h \cdot \nu \quad [2]$$

(donde h es la constante de Planck)

Se puede definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia.

Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electro-magnética tiene un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda se denomina espectro electro magnético.

Según Chuvieco, E. (1995) desde el punto de vista de la teledetección, las bandas espectrales más utilizadas son:

-*Espectro visible* (0.4 a 0.7 μ m). Distinguiéndose tres bandas elementales: Azul (0.4 - 0.5 μ m), Verde (0.5 - 0.6 μ m) y Rojo (0.6 - 0.7 μ m) en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.

-*Infrarrojo cercano* (IRC 0.7 - 1.3 μ m). Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

-*Infrarrojo medio* (IRM 1.3 - 8 μ m). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. En el primer caso hablamos del infrarrojo de onda corta (SWIR) que se sitúa entre 1.3 - 2.5 μ m y resulta una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o en los suelos. La segunda banda de interés está comprendida entre 3 y 5 μ m y suele denominarse infrarrojo medio, siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura.

-*Infrarrojo lejano o térmico* (IRT 8 - 14 μ m) que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

-*Micro-ondas* (M por encima de 1mm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

2.2 Comportamiento espectral de la vegetación en el espectro óptico

"La caracterización espectral de las masas vegetales ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiancia que detecta el sensor" (Chuvienco, E., 1995).

Estos factores se pueden dividir en tres grandes grupos:

-Los relacionados con la reflectividad de la hoja, que suele ser el elemento más visible desde una plataforma espacial. Los factores más destacados aquí son: la presencia de pigmentos, la estructura celular y el contenido de humedad.

-Las características geométricas de la planta, principalmente la forma de la hoja y su distribución en la planta.

-Aspectos derivados de la situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, geometría de la plantación, condiciones atmosféricas, etc.

La baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, principalmente las clorofilas, xantofila y caroteno.

La alta reflectividad en el infrarrojo cercano se debe por un lado a la baja absorción de las clorofilas y por otro a la estructura celular interna de la hoja.

La observación remota de las cubiertas vegetales puede apoyarse en el gran contraste cromático que presenta la vegetación vigorosa entre las distintas bandas del espectro, especialmente entre el visible (alta absorción, baja reflectividad) y el IRC (alta reflectividad).

2.3 Interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación

Cada objeto sobre la superficie terrestre refleja de forma diferente la radiación incidente, de acuerdo al tipo de material; vegetación, suelo, roca, agua, etc. Esto permite caracterizar al objeto midiendo la radiación reflejada.

2.4 Interacción atmósfera-radiación

La atmósfera terrestre solo refleja pequeñas cantidades de radiación solar, la transformación de esta, tanto la entrante como la saliente incluye tres procesos:

1 - Dispersión: es el direccionamiento de la radiación por parte de los gases presentes en la atmósfera en cualquier dirección. Existen tres tipos de dispersión: dispersión de Rayleigh que se produce en la alta atmósfera (9-10Km), dispersión de Mie que se produce en la baja atmósfera (0-5Km) y la dispersión no selectiva.

2 - Refracción

Es el cambio de dirección de luz, que ocurre cuando esta atraviesa dos campos con diferentes densidades.

3 - Absorción

Los gases atmosféricos pueden absorber radiación en diferentes longitudes de onda. Estos gases son principalmente tres:

Ozono, radiación ultravioleta

Dióxido de carbono, radiación entre 13 μm y 17,5 μm

Vapor de agua, radiación entre 5,5 μm y 7 μm y por encima de 27 μm

Como consecuencia de esta absorción, la observación espacial se reduce a determinadas bandas del espectro, conocidas como ventanas atmosféricas, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta (Ordoñez, A. y Serna, J., 2015).

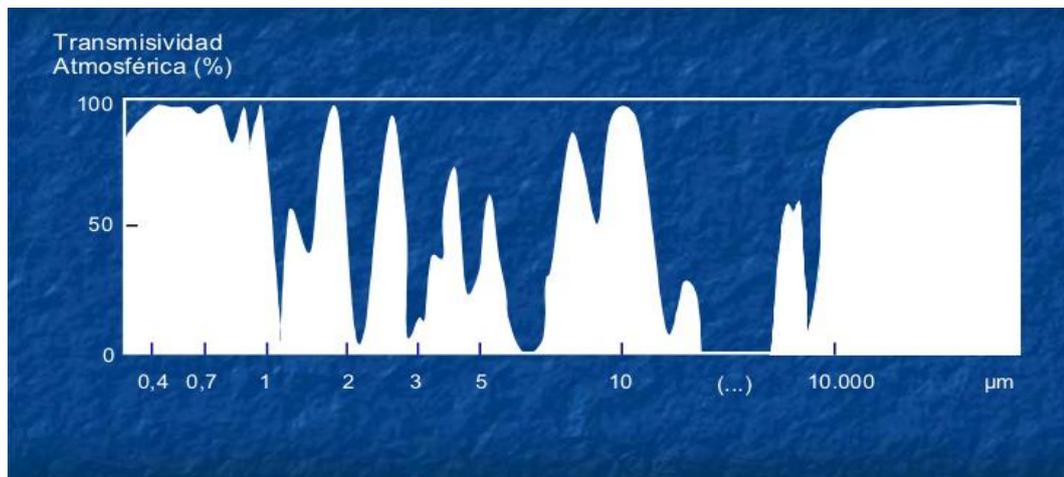


Fig. 1 - Transmisividad atmosférica en función de la longitud de onda
Fuente: Curso SIG nivel 1-CREA

2.5 Imágenes satelitales

"Una imagen satelital es la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial" (Chuvieco, E., 1995).

2.6 Teledetección

La teledetección es el sistema integral de captura de información territorial, a partir de la radiación electromagnética captada por el sensor que se emplea cada día con mayor asiduidad para la captura tanto

de información temática (medioambiental), como de información topográfica (MDT, planimetría) (Arozarena Villar, A.).

2.7 Características de las imágenes Landsat utilizadas

CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES LANDSAT					
Plataforma / Sensor	Resolución espectral (μ)	Resolución espacial (m)	Resolución temporal (Días)	Resolución radiométrica (Bits)	Área de cobertura (km)
Landast-5 TM Thematic Mapper	B1: 0.45-0.52 (visible-azul)	30	16	8	185 x 170
	B2: 0.52-0.60 (visible-verde)	30			
	B3: 0.63-0.69 (visible-rojo)	30			
	B4: 0.76-0.90 (R cercano)	30			
	B5: 1.55-1.75 (R medio)	30			
	B6: 10.4-12.5 (R térmico)	120			
	B7: 2.08-2.35 (R medio)	30			
Landast-8 Operational Land Imager (OI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	B1: 0.43-0.45 (aerosol costero)	30	16	16	183 X 170
	B2: 0.45-0.51 (visible-azul)	30			
	B3: 0.53-0.59 (visible-verde)	30			
	B4: 0.64-0.67 (visible-rojo)	30			
	B5: 0.85-0.88 (R cercano)	30			
	B6: 1.57-1.65 (SWIR 1)	30			
	B7: 2.11-2.29 (SWIR 2)	30			
	B8: 0.50-0.68 (Pancromatica)	15			
	B9: 1.36-1.38 (Cirrus)	30			
	B10: 10.6-11.19 infrarrojo térmico (TIRS) 1	100			
	B11: 11.50-12.51 infrarrojo térmico (TIRS) 2	100			

Tabla 1 - Características de las imágenes Landsat

Fuente: Elaboración propia en base a datos de USGS

2.8 Fundamentación de la corrección

"La detección de cambios a partir de una secuencia multi-temporal de imágenes de satélite es una de las aplicaciones más importantes que tiene la teledetección. Este proceso requiere de una adecuada corrección de las imágenes, de manera que los cambios detectados solo sean atribuibles a verdaderas modificaciones del paisaje" (Ambrosio, G. *et al.*).

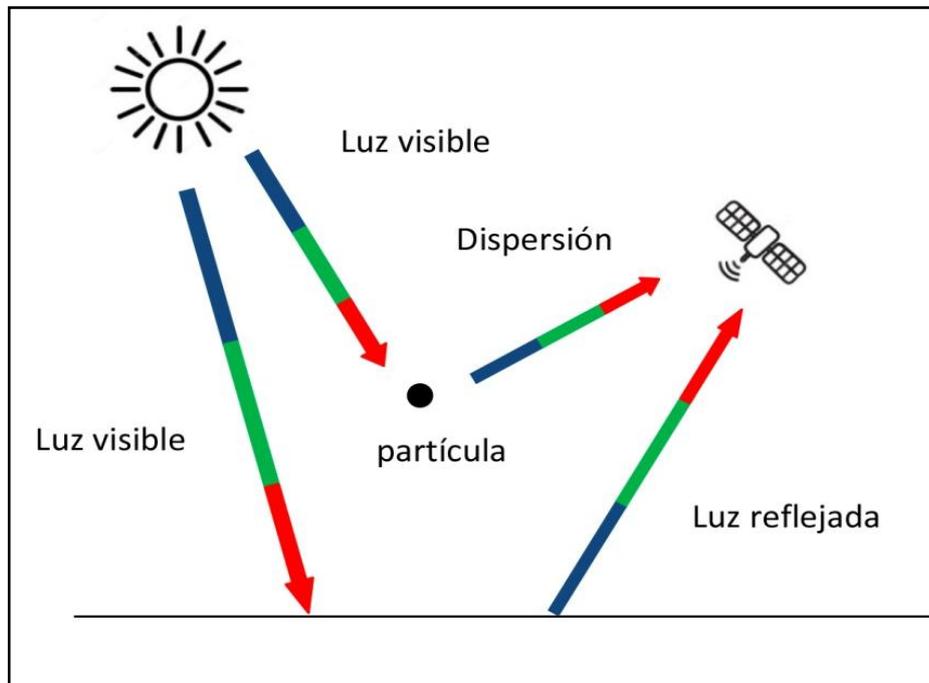


Fig. 2 - Esquema de la dispersión atmosférica.
Fuente: Elaboración propia.

Para lograr este objetivo se realizan dos procesos fundamentales: la corrección radiométrica y la corrección atmosférica.

La corrección radiométrica implica, a su vez, dos procesos: en primer lugar el cálculo de radiancias a partir de los niveles digitales de la imagen y los coeficientes de corrección y en segundo lugar el cálculo de la reflectividad aparente (en el techo de la atmósfera) denominada TOA.

El primer proceso de corrección fue omitido ya que el proveedor de las imágenes (USGS) lo fue realizando para cada una de las imágenes de su base de datos, por lo que se pudo acceder a las imágenes ya corregidas.

El segundo proceso se utiliza para obtener la reflectividad aparente (en el techo de la atmósfera) uniformizando las condiciones del ángulo de incidencia solar, distancia tierra-sol e irradiancia espectral solar exoatmosférica (Hantson, S. *et al.*, 2011).

El segundo proceso (corrección atmosférica) pretende convertir los valores de reflectividad aparente en el techo de la atmósfera a reflectividad en la superficie terrestre. El método que se utilizó para este proceso fue el de sustracción de píxeles oscuros de Chávez.

Este método, también llamado método DOS por sus siglas en inglés (*Dark Object Subtraction*), es (según Sendra, V. *et al.*, 2015) un método simple de corrección atmosférica ya que no necesita ninguna información sobre las condiciones atmosféricas. Asume que la reflectancia de los objetos oscuros incluye una componente importante de la difusión atmosférica.

El concepto es: si se tiene un objeto completamente negro y que, por lo tanto, no refleja la luz, este objeto debería tener un valor cero de reflectancia. Como ese valor en el sensor del satélite tiene un valor no nulo (diferente de cero), entonces ese valor de reflectividad será ocasionado por la distorsión generada por las partículas presentes en la atmósfera.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO

Para el presente trabajo se elaboró un diagrama de flujo de 5 fases las cuales se detallan a continuación.

Diagrama de flujo

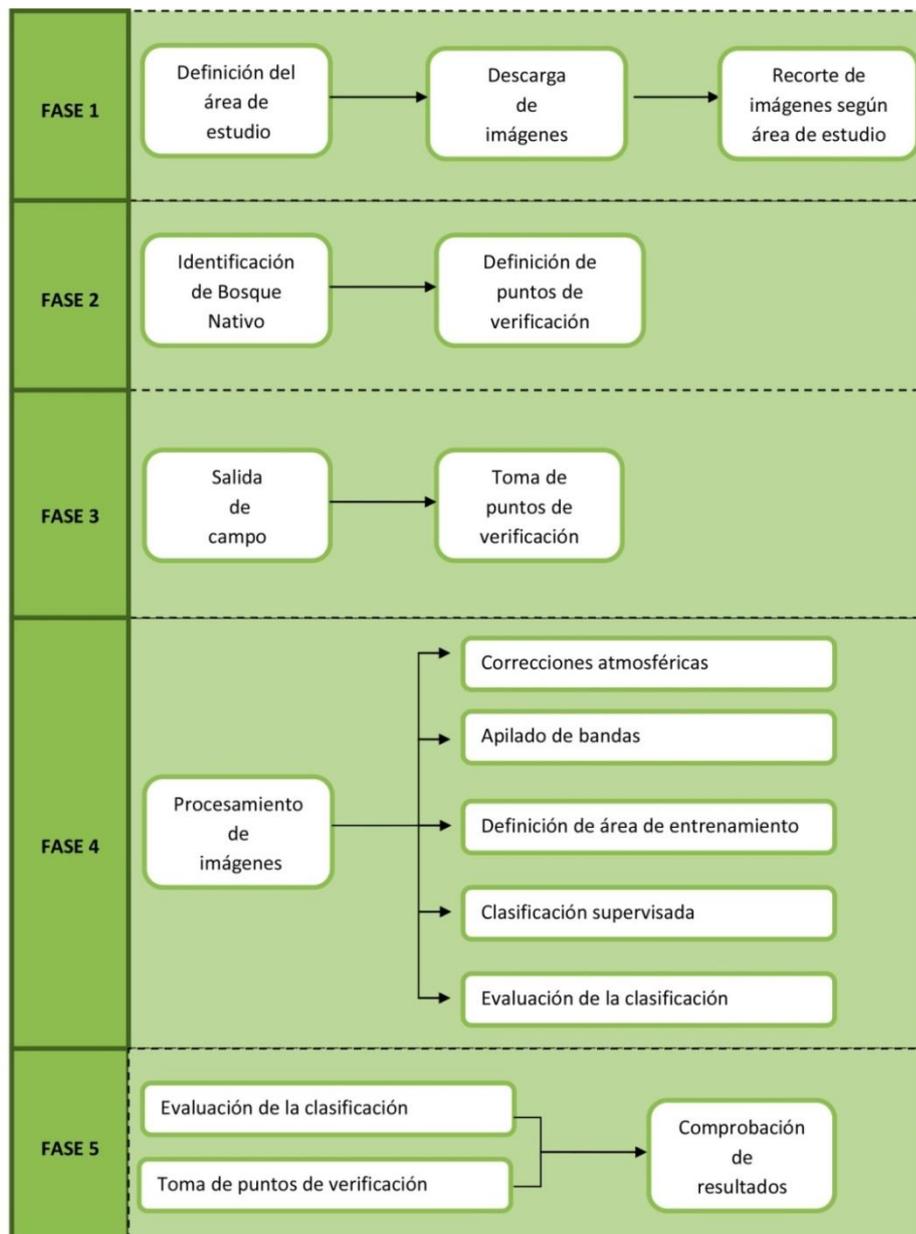


Fig. 3 - Diagrama de flujo del proceso de trabajo

Fuente: Elaboración propia

3.1 Insumos de trabajo

-Imágenes satelitales de los sensores Landsat 5 para los años: 1984, 2000, 2004, 2008 y 2011; y Landsat 8 para el año 2016.

-Puntos de campo cedidos por la Dirección General Forestal levantados en los años 2010 y 2014.

-Puntos de campo levantados directamente en diciembre del año 2017.

-Software utilizado: SOPI (CONAE), ArcGis, Google Earth Pro.

3.2 Fase 1: definición del área de estudio

3.2.1 Ubicación geográfica del proyecto

La cuenca del río Santa Lucía se encuentra localizada geográficamente en la zona sur del territorio nacional. Con una superficie de 13.487 km², abarca parte del territorio de seis departamentos: Montevideo, Canelones, San José, Florida, Flores y Lavalleja.

Para la delimitación de la zona de estudio se utilizó una existente en *shape file* realizada por el Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA) de Facultad de Ciencias.

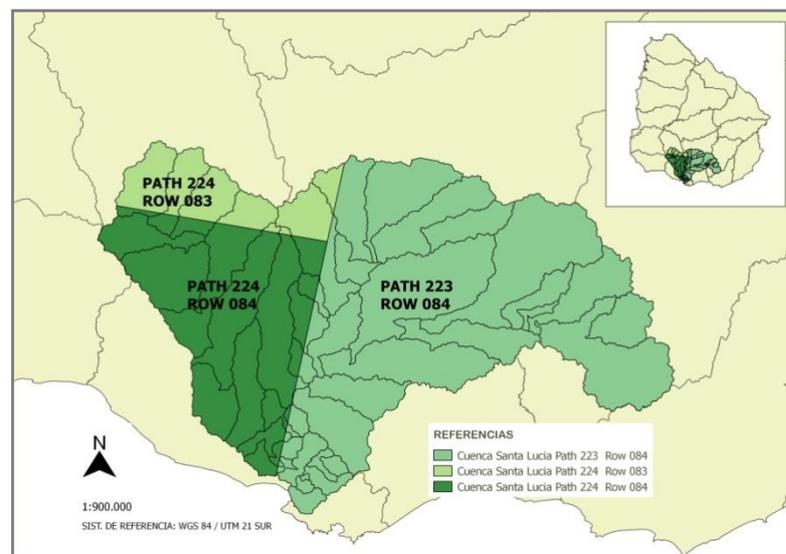


Fig. 4 Mapa de sectorización de la cuenca según escenas Landsat

Como se hace referencia más adelante en la sección 3.4.6 (Proceso de clasificación supervisada), si bien el objetivo inicial del proyecto era abarcar toda la cuenca, en esa etapa de trabajo se resolvió restringir el área de estudio al sector correspondiente a la escena Landsat *path* 224 - *row* 084, en virtud de la escasez de puntos de control de los que se disponían (concentrados mayoritariamente en la escena elegida). Por otra parte, al realizar los primeros procesos de prueba de clasificación y selección de puntos de entrenamiento y control, se pudo verificar que los tiempos insumidos para este proceso para cada imagen excedían la proyección de tiempo total de trabajo estimado para todo el proyecto, por lo que se entendió adecuado restringir el área a la correspondiente a una sola imagen, en el entendido que los resultados podían resultar representativos de los esperados para toda la cuenca, a los efectos de los objetivos del proyecto.

3.2.2 Descarga de las imágenes desde el USGS

Se descargaron imágenes de los satélites Landsat 5 y Landsat 8 de acceso gratuito desde la *United State Geological Survey* (USGS).

En el momento del análisis de los insumos a utilizar, si bien se preveía la utilización de imágenes del satélite Landsat 7 en lugar de Landsat 5, se optó por este último porque las imágenes de Landsat 7 a partir del año 2003 presentan un efecto de bandeo debido a una falla del sensor. Si bien se han desarrollado mecanismos de corrección de este problema, pueden provocar distorsiones a los valores de sus niveles digitales lo que, a los efectos del objetivo de este trabajo, podría resultar inconveniente.

La zona de estudio está compuesta por 3 imágenes Landsat : *path* 224, *row* 83; *path* 224, *row* 84; *path* 223, *row* 84. Con una resolución espacial de 30 m y resolución radiométrica para Landsat 5 de 8 bits y para Landsat 8 de 16 bits.

Las imágenes utilizadas están comprendidas en el período octubre-diciembre de cada año analizado, procurando aprovechar los niveles más altos de clorofila, humedad y vigorosidad que presenta la vegetación en el período primavera-verano, con el fin de obtener una mejor clasificación. A su vez, dentro de las imágenes de ese período se buscó que presentaran un bajo porcentaje de nubes, lo que haría imposible el proceso de clasificación.

	AÑO	Path 224 Row 83	Path 224 Row 84	Path 223 Row 84
IMÁGENES LANDSAT 8	2016	LC08_L1TP_224083_20161217_20170316_01_T1 Fecha 17/12/2016	LC08_L1TP_224084_20161217_20170316_01_T1 Fecha 17/12/2016	LC08_L1TP_223084_20161124_20170317_01_T1 Fecha 24/11/2016
	2011	LT05_L1TP_224083_20110830_20161006_01_T1 Fecha 30/08/2011	LT05_L1TP_224084_20110424_20161209_01_T1 Fecha 24/04/2011	LT05_L1TP_223084_20110908_20161006_01_T1 Fecha 03/11/2011
IMÁGENES LANDSAT 5	2008	LT05_L1TP_224083_20081008_20161029_01_T1 Fecha 08/10/2008	LT05_L1TP_224084_20081008_20161029_01_T1 Fecha 08/10/2008	LT05_L1TP_223084_20081102_20161029_01_T1 Fecha 02/11/2008
	2004	LT05_L1TP_224083_20041130_20161128_01_T1 Fecha 30/11/2004	LT05_L1TP_224084_20041216_20161127_01_T1 Fecha 16/12/2004	LT05_L1TP_223084_20041107_20161129_01_T1 Fecha 07/11/2004
	2000	LT05_L1TP_224083_20001103_20161213_01_T1 Fecha 03/11/2000	LT05_L1TP_224084_20001103_20161213_01_T1 Fecha 03/11/2000	LT05_L1TP_223084_20001011_20161213_01_T1 Fecha 11/10/2000
	1984	LT05_L1TP_224083_19841209_20170219_01_T1 Fecha 09/12/1984	LT05_L1TP_224084_19841225_20170219_01_T1 Fecha 25/12/1984	LT05_L1TP_223084_19841031_20170220_01_T1 Fecha 31/10/1984

Tabla 2 - Inventario de imágenes Landsat utilizadas.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Fase 2 y 3: Identificación del bosque nativo y salida de campo

3.3.1 Identificación del bosque nativo

Mediante fotointerpretación de imágenes de *Google Earth* se marcaron puntos dentro de la zona de estudio donde se identifica cobertura de bosque nativo ribereño para su posterior validación en campo.

3.3.2 Salida de campo

Al planificar la salida de campo se marcaron puntos dispersos en toda la cuenca, pero por limitaciones de tiempo fue necesario concentrarse en una sub-zona, por lo que optamos por el noroeste de la cuenca ya que era la zona con menos datos de verificación. Para el resto de la cuenca se contaba como insumo con puntos de campo de la Dirección General Forestal de los años 2011 y 2014.

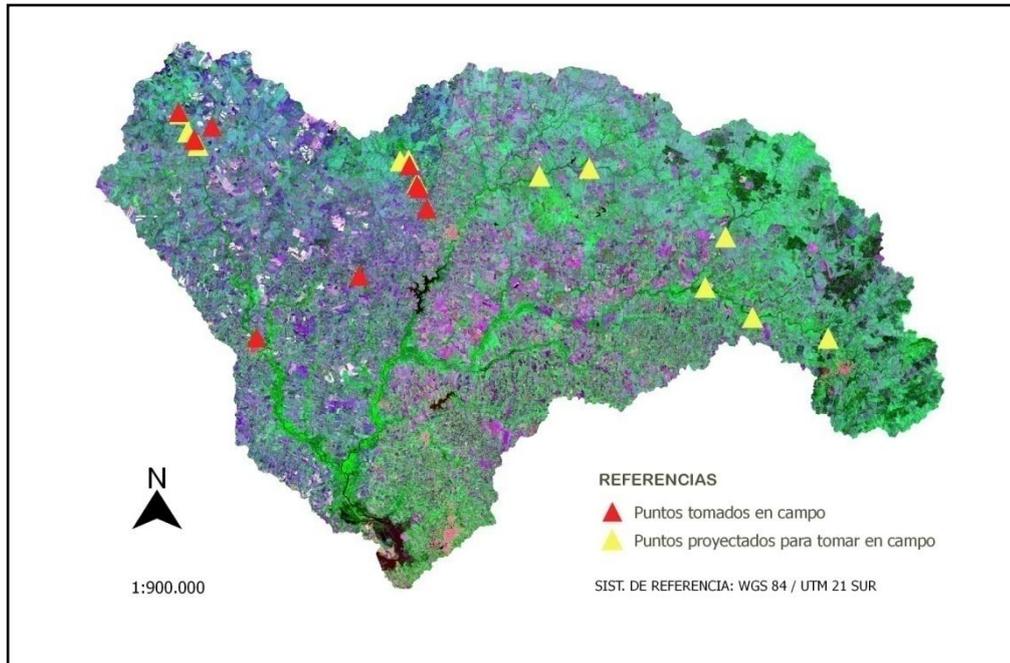


Fig. 5 - Puntos proyectados y puntos tomados en campo

3.4 Fase 4: procesamiento de las imágenes

3.4.1 Selección de bandas

Una vez descargadas las imágenes de la zona de estudio se optó por utilizar las bandas del Rojo, Infrarrojo cercano e Infrarrojo medio (bandas 3, 4, 5 respectivamente para Landsat 5 y bandas 4, 5, 6 para Landsat 8).

Se entiende que para la finalidad de este trabajo estas bandas son las que proporcionan más información, en base a los fundamentos teóricos proporcionados por Chuvieco, E. (2008) respecto a las propiedades y posibilidades de cada banda.

3.4.2 Corrección radiométrica

El primer paso para la corrección radiométrica -el cálculo de la radiancia espectral obtenida por el sensor- se omitió según se detalla en los fundamentos teóricos de este informe (cap. 2.8, pág. 9) ya que el USGS comenzó a tener disponibles las imágenes con la corrección realizada. Esta corrección se realiza en base a la siguiente ecuación (Hanston, S. *et al.*, 2011):

$$L1 = G \cdot ND + B \quad [3]$$

Donde: L_λ es la radiancia espectral obtenida por el sensor

ND los niveles digitales de la imagen

G es la ganancia

B es el sesgo

Los valores de ganancia y sesgo se obtienen de los metadatos de la imagen.

El segundo paso de la corrección radiométrica es el cálculo de la reflectividad aparente en el techo de la atmósfera (TOA), para lo que se aplica la siguiente ecuación:

$$\rho^{TOA} = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{E_0\lambda \cdot \cos\theta}$$

[4]

Donde: d: es la distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen (expresada en unidades astronómicas).

L_λ : es la radiancia espectral.

$E_0\lambda$: es la irradiancia espectral solar exoatmosférica.

θ : es el ángulo cenital solar (este dato se obtiene del metadato de la propia imagen).

Los parámetros d y $E_0\lambda$ son sugeridos en Hantson, S. *et al.* (2011) basados en datos proporcionados por Chander, G. *et al.* (2009).

3.4.3 Corrección atmosférica

Para poder comparar la radiometría entre imágenes de una serie temporal es necesario convertir la reflectividad aparente (TOA) a reflectividad de la superficie terrestre. Para estas correcciones se optó por el método del objeto oscuro de Chávez, desarrollado por Hantson, S. *et al.* (2011) ya que proporciona mejores resultados en el espectro visible. El modelo toma en cuenta la transmisividad de la atmósfera en el camino Sol-Tierra y la dispersión producida por la atmósfera. Los valores de esta corrección se obtienen mediante la ecuación:

$$\rho = \frac{\pi \cdot (L - L_a) \cdot d^2}{\cos\theta \cdot E_0\lambda \cdot \tau_1 \cdot \tau_2}$$

[5]

Donde: ρ : es la reflectividad

d : es la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas

L : es la radiancia del pixel a corregir

L_a : es la radiancia recibida por el sensor en un área donde solo hay contribución de la atmosfera

θ : es el ángulo cenital solar

$E_0\lambda$: es la irradiancia espectral solar exoatmosférica

τ_1 : es el coeficiente de transmisión atmosférica en el camino Sol-Tierra

τ_2 : es el coeficiente de transmisión atmosférica en el camino Tierra-sensor

Para τ_1 se usan los valores estándar: 0,70; 0,78; 0,85 y 0,91, dados por Chávez (1996), para las bandas 1-4 respectivamente y 0,95 y 0,97 para las bandas 5 y 7, propuestos por Gilabert, M. A. *et al.* (1994).

Para los valores de τ_2 se considera $\cos \iota$, siendo ι el ángulo cenital del sensor. Para imágenes Landsat ese valor sería 1 ya que la observación es siempre vertical.

Para la estimación de L_a , se utiliza el valor mínimo de ND del histograma de cada banda en el umbral de 200 pixeles -o sea se elige como ND mínimo el primero que supere la cantidad de 200 pixeles-.

3.4.4 Corrección radiométrica y atmosférica

Como el valor L de la ecuación de la corrección atmosférica [5] es el resultante ρ_{TOA} de la ecuación de corrección radiométrica [4], integramos ambas ecuaciones para hacer el proceso de corrección en un sólo paso:

$$\rho = \frac{\pi \cdot d^2 (\pi \cdot ND \cdot d^2 - L_a \cdot E_0\lambda \cdot \cos\theta)}{(E_0\lambda)^2 \cdot (\cos\theta)^2 \cdot \tau_1}$$

[6]

Donde todos los parámetros son los descritos en 3.5 y 3.6.

Se realizaron los cálculos para cada banda e imagen siguiendo el siguiente esquema (Tabla 3):

AÑO 2011										
Path/Row	Banda	Rango espectral (µm)	Región del espectro	E ₀ λ	θ	θ rad	cosθ	d	La	t ₁
224/083	LT05_L1TP_224083_20110830_20161006_01_T1									
	3	0.63 - 0.69	visible - rojo	1536	53.9038	0.9408	0.5891	1,0092	14	0.85
	4	0.76 - 0.90	Infrarrojo cercano	1031	53.9038	0.9408	0.5891	1,0092	12	0.91
	5	1.55 - 1.75	Infrarrojo cercano	220	53.9038	0.9408	0.5891	1,0092	8	0.95
224/084	LT05_L1TP_224084_20110424_20161209_01_T1									
	3	0.63 - 0.69	visible - rojo	1536	57.7900	1.0086	0.5330	1,0058	11	0.85
	4	0.76 - 0.90	Infrarrojo cercano	1031	57.7900	1.0086	0.5330	1,0058	7	0.91
	5	1.55 - 1.75	Infrarrojo cercano	220	57.7900	1.0086	0.5330	1,0058	6	0.95
223/084	LT05_L1TP_223084_20110908_20161006_01_T1									
	3	0.63 - 0.69	visible - rojo	1536	52.0164	0.9079	0.6154	1,4082	13	0.85
	4	0.76 - 0.90	Infrarrojo cercano	1031	52.0164	0.9079	0.6154	1,4082	11	0.91
	5	1.55 - 1.75	Infrarrojo cercano	220	52.0164	0.9079	0.6154	1,4082	5	0.95

Tabla 3 - Datos base de cálculo de correcciones para el año 2011.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5 Apilado de bandas

Luego del proceso de corrección se realiza el apilado de bandas, generando un único archivo con tres bandas (rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio) para cada escena Landsat y para cada fecha de análisis.

3.4.6 Proceso de clasificación supervisada

Como se menciona en 3.2.1 (Ubicación geográfica del proyecto), luego de las primeras pruebas de clasificación y evaluando la distribución de puntos de control y verificación, se decidió restringir el área de estudio al sector de la cuenca correspondiente a la escena Landsat: *path 224 row 084*, dada la insuficiente cantidad de puntos de campo y la optimización de los tiempos de trabajo.

Ya restringida el área de estudio, se establecieron para la clasificación cinco clases de cobertura:

- Bosque nativo
- Urbano
- Agua
- Bosque plantado

- Cultivo y otros

Una vez definidas las clases se crearon capas de puntos de entrenamiento y de control para cada año. Se utilizaron los puntos proporcionados por la DGF para bosque nativo y plantado y los de la salida de campo para bosque nativo. Se agregaron puntos por fotointerpretación para esas coberturas y se generaron enteramente por fotointerpretación para las coberturas: agua, cultivo y urbano.

Se crearon las firmas espectrales para cada año mediante la herramienta *Create Signatures* dentro del paquete *Multivariate* de *Spatial Analyst Tools* del programa ArcGis.

Se realizó una clasificación supervisada para cada año mediante la herramienta *Maximun Likelihood Classification* (Clasificación de Máxima Verosimilitud) dentro del paquete *Multivariate* de *Spatial Analyst Tools*. Luego de diversos ensayos modificando el parámetro *Reject Fraction* se fijó en 0.25 para todas las clasificaciones. Este parámetro refiere a la porción de las celdas que permanecerán no clasificadas dada la menor posibilidad de asignaciones correctas.

3.4.7 Creación de matriz de confusión

Se elaboraron las matrices de confusión para cada año utilizando como insumos las imágenes resultantes de la clasificación y las capas de puntos de control. Para este proceso se utilizaron las herramientas *Extract values to Point*, *Frecuency*, *Pivot Table* y *Table to Excel* de ArcGis.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Mapas de resultados

A partir de los datos resultantes del proceso de trabajo realizado, se generó un mapa comparativo de bosque nativo 1984 - 2016 (Fig. 6), un mapa de cobertura de bosque nativo multi-temporal (Fig. 7) y mapa de coberturas multi-temporal (Fig. 8).

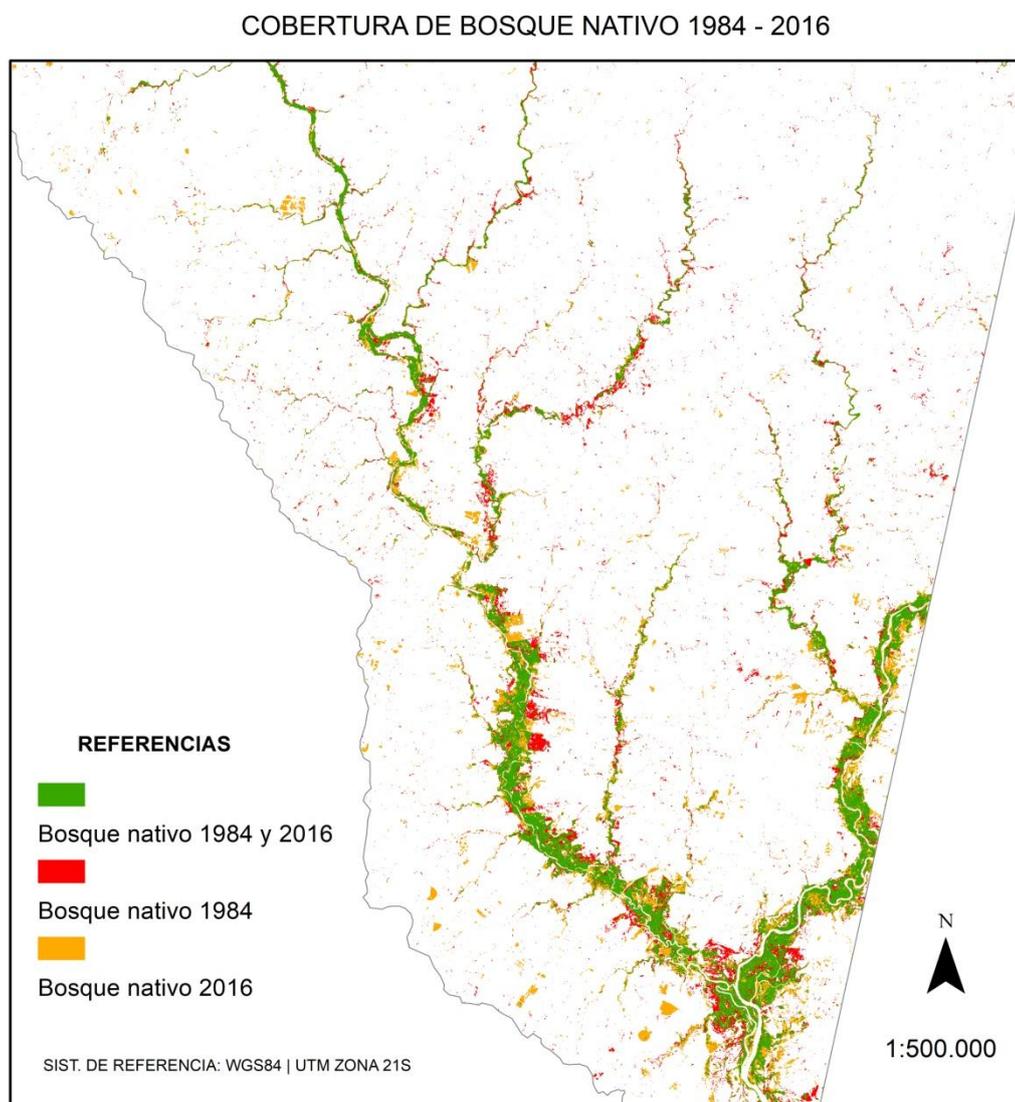


Fig. 6 - Mapa comparativo de cobertura bosque nativo 1984 - 2016

COBERTURA DE BOSQUE NATIVO 1984-2016

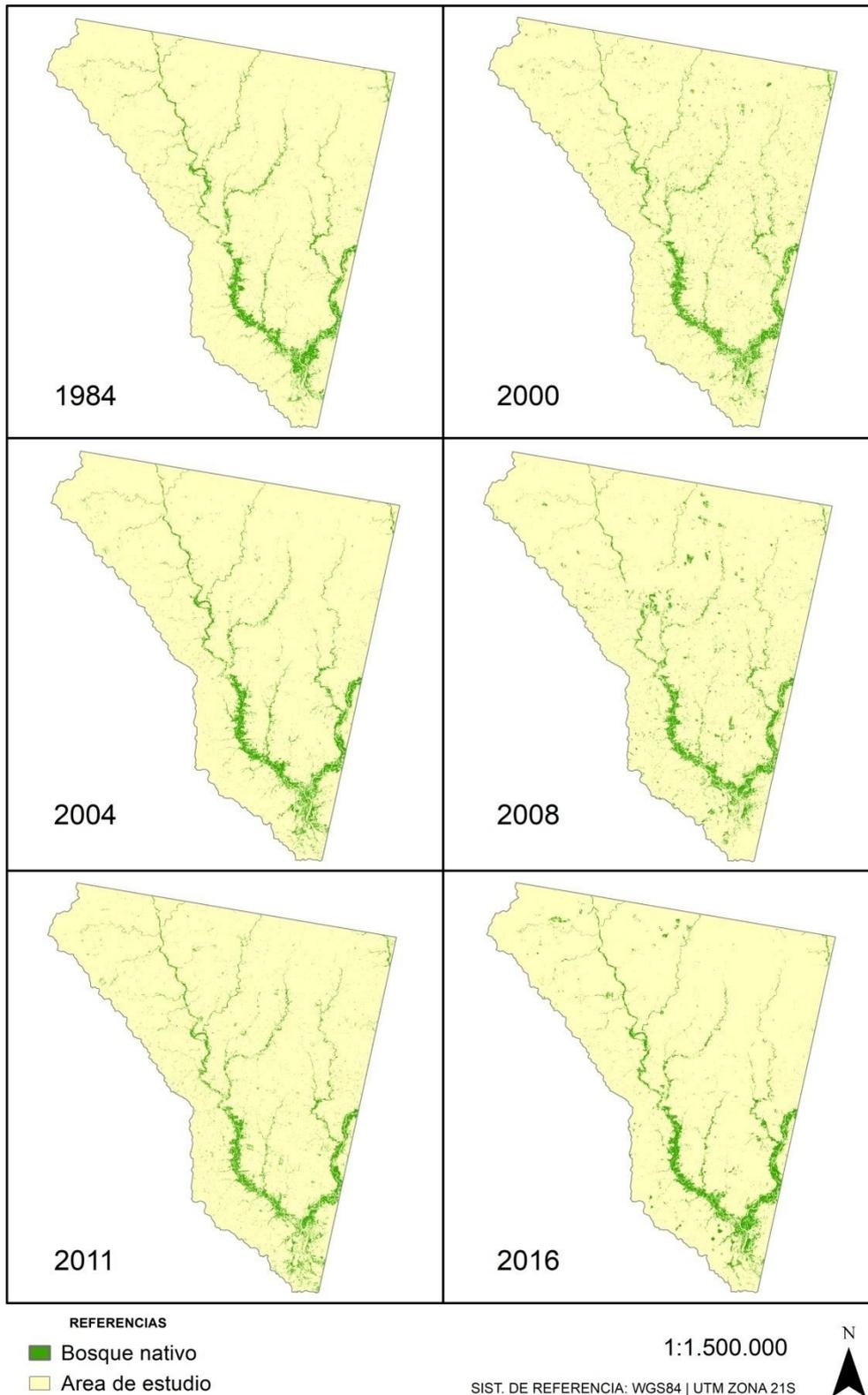
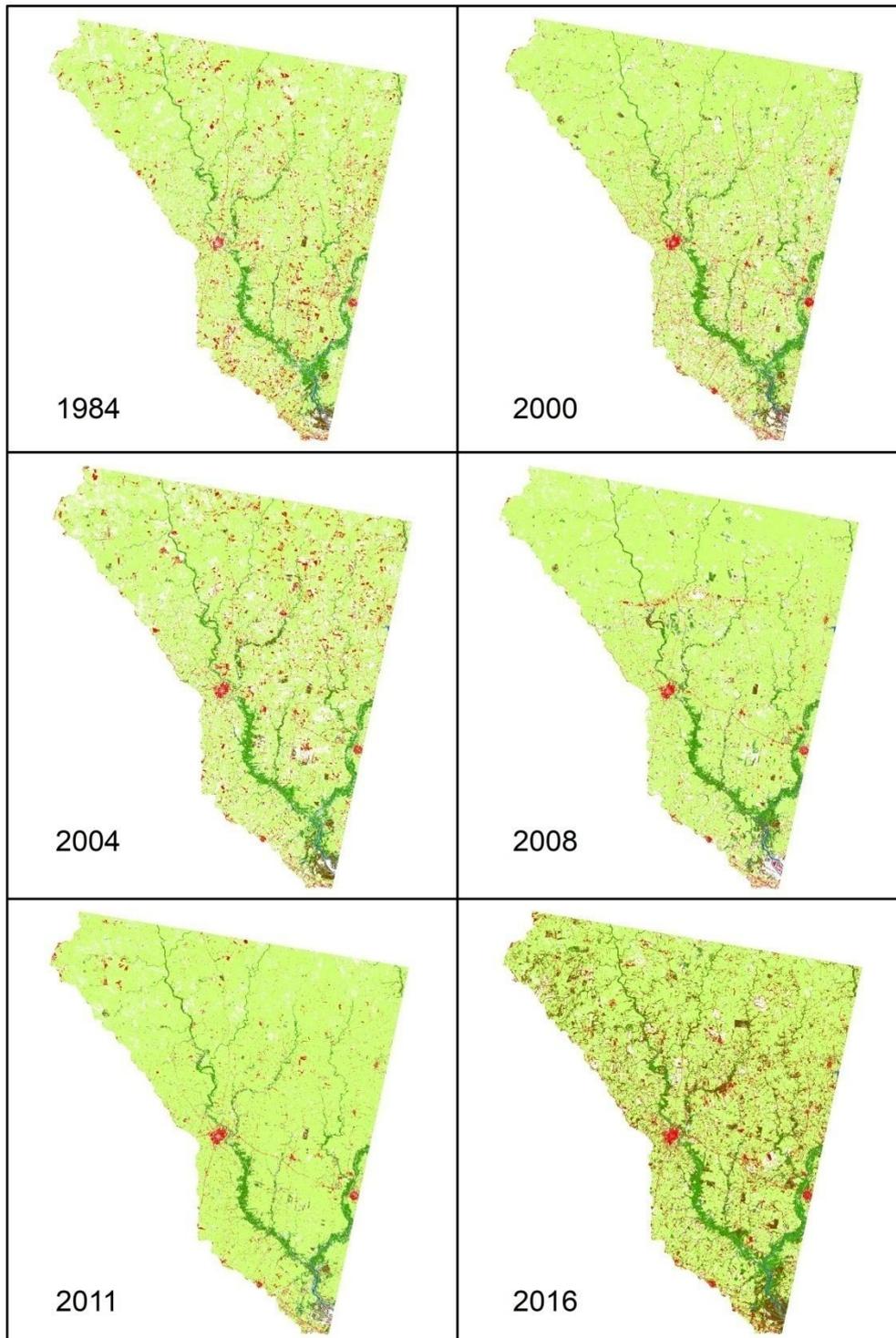


Fig. 7 - Mapa multi-temporal de cobertura bosque nativo 1984 - 2016

MAPAS DE COBERTURA DE SUELO 1984 - 2016



REFERENCIAS

- Nativo
- Agua
- Cultivos
- Urbano
- Plantado

1:1.500.000

SIST. DE REFERENCIA: WGS84 | UTM ZONA 21S



Fig. 8 - Mapa multi-temporal de cobertura del suelo 1984 - 2016

4.2 Matrices de confusión

Se generaron matrices de confusión para cada año de estudio:

AÑO 1984						
Clase	Bosque nativo	Urbano	Agua	Bosque plantado	Cultivo y otros	Totales
Sin clasificar	32	7	42	27	50	158
Bosque nativo	172	0	0	5	0	177
Urbano	0	35	0	1	18	54
Agua	0	0	88	0	0	88
Bosque plantado	3	0	0	72	0	75
Cultivo y otros	2	9	0	6	211	228
Totales	209	51	130	111	279	780
Ptos. Clasif. correctam.	578					
Total ptos. Referencia	780					
				Cálculo de error (porcentaje)		
				Comisión	Omisión	
Ptos. Clasificados	622		Bosque nativo	2.8	17.7	
Ptos. Sin clasific.	158		Urbano	35.2	31.4	
			Agua	0.0	32.3	
			Bosque plantado	4.0	35.1	
Precisión (porcentaje)	74.1		Cultivo y otros	7.5	24.4	

Tabla 4 - Matriz de confusión para el año 1984

AÑO 2000						
Clase	Bosque nativo	Urbano	Agua	Bosque plantado	Cultivo y otros	Totales
Sin clasificar	21	8	20	21	85	155
Bosque Nativo	169	0	0	0	3	172
Urbano	0	48	0	0	4	52
Agua	0	0	130	0	0	130
Bosque plantado	15	0	0	84	1	100
Cultivo y otros	0	0	0	0	193	193
Totales	205	56	150	105	286	802
Ptos. Clasif. correctam.	624					
Total ptos. Referencia	802					
				Cálculo de error (porcentaje)		
				Comisión	Omisión	
Ptos. Clasificados	647		Bosque nativo	1.7	17.6	
Ptos. Sin clasific.	155		Urbano	7.7	14.3	
			Agua	0.0	13.3	
			Bosque plantado	16.0	20.0	
Precisión (porcentaje)	77.8		Cultivo y otros	0.0	32.5	

Tabla 5 - Matriz de confusión para el año 2000

AÑO 2004						
Clase	Bosque Nativo	Urbano	Agua	Bosque plantado	Cultivo y otros	Totales
Sin clasificar	13	14	25	31	77	160
Bosque Nativo	179	0	0	4	0	183
Urbano	0	45	0	0	11	56
Agua	0	0	126	0	0	126
Bosque plantado	13	0	0	50	0	63
Cultivo y otros	1	2	0	0	209	212
Totales	206	61	151	85	297	800
Ptos. Clasif. correctam.	609					
Total ptos. Referencia	800					
				Cálculo de error (porcentaje)		
				Comisión	Omisión	
Ptos. Clasificados	640		Bosque Nativo	2.2	13.1	
Ptos. Sin clasific.	160		Urbano	19.6	26.2	
			Agua	0.0	16.6	
			Bosque plantado	20.6	41.2	
Precisión (porcentaje)	76.1		Cultivo y otros	1.4	29.6	

Tabla 6 - Matriz de confusión para el año 2004

AÑO 2008							
Clase	Bosque Nativo	Urbano	Agua	Bosque plantado	Cultivo y otros	Totales	
Sin clasificar	7	10	19	28	47	111	
Bosque Nativo	140	0	0	8	4	152	
Urbano	0	54	0	0	0	54	
Agua	0	0	134	0	0	134	
Bosque plantado	60	0	0	67	2	129	
Cultivo y otros	0	4	0	0	237	241	
Totales	207	68	153	103	290	821	
Ptos. Clasif. correctam.	632						
Total ptos. Referencia	821						
				Cálculo de error (porcentaje)			
				Comisión	Omisión		
Ptos. Clasificados	710		Bosque Nativo	7.9	32.4		
Ptos. Sin clasific.	111		Urbano	0.0	20.6		
			Agua	0.0	12.4		
			Bosque plantado	48.1	35.0		
Precisión (porcentaje)	77.0		Cultivo y otros	1.7	18.3		

Tabla 7 - Matriz de confusión para el año 2008

AÑO 2011							
Clase	Bosque Nativo	Urbano	Agua	Bosque plantado	Cultivo y otros	Totales	
Sin clasificar	8	9	51	44	39	151	
Bosque Nativo	182	0	0	17	0	199	
Urbano	1	57	0	0	11	69	
Agua	0	0	109	0	0	109	
Bosque plantado	19	0	0	72	0	91	
Cultivo y otros	1	2	0	2	249	254	
Totales	211	68	160	135	299	873	
Ptos. Clasif. correctam.	669						
Total ptos. Referencia	873						
				Cálculo de error (porcentaje)			
				Comisión	Omisión		
Ptos. Clasificados	722		Bosque Nativo	8.5	13.7		
Ptos. Sin clasific.	151		Urbano	17.4	16.2		
			Agua	0.0	31.9		
			Bosque plantado	20.9	46.7		
Precisión (porcentaje)	76.6		Cultivo y otros	2.0	16.7		

Tabla 8 - Matriz de confusión para el año 2011

AÑO 2016							
Clase	Bosque Nativo	Urbano	Agua	Bosque plantado	Cultivo y otros	Totales	
Sin clasificar	2	1	23	11	28	65	
Bosque Nativo	193	0	0	28	2	223	
Urbano	0	61	0	1	11	73	
Agua	0	0	115	0	0	115	
Bosque plantado	16	0	0	71	8	95	
Cultivo y otros	0	6	0	1	250	257	
Totales	211	68	138	112	299	828	
Ptos. Clasif. correctam.	690						
Total ptos. Referencia	828						
				Cálculo de error (porcentaje)			
				Comisión	Omisión		
Ptos. Clasificados	763		Bosque Nativo	13.5	8.5		
Ptos. Sin clasific.	65		Urbano	16.4	10.3		
			Agua	0.0	16.7		
			Bosque plantado	25.3	36.6		
Precisión (porcentaje)	83.3		Cultivo y otros	2.7	16.4		

Tabla 9 - Matriz de confusión para el año 2016

CONCLUSIONES

Se realizó el cálculo de la superficie correspondiente a la cobertura bosque nativo en las diferentes fechas, cuyos resultados se muestran en la Tabla 10:

Año	Superficie (ha)
1984	18927
2000	21021
2004	19441
2008	19936
2011	20110
2016	20252

Tabla 10 - Evolución de la superficie de bosque nativo

A la luz de estos datos puede concluirse que la variación de la superficie de bosque nativo no ha tenido una magnitud significativa. Hay un aumento relativamente pronunciado del 11% entre el año 1984 y el 2000, luego una disminución del 9% entre el 2000 y el 2004, y a partir de ese año un aumento sostenido del 2.5%, 0.9% y 0.7% para los años 2008, 2011 y 2016 respectivamente. Estos valores incluso se encuentran dentro de los errores de clasificación previsible, por lo que puede concluirse que para el período estudiado y en esta escala de trabajo la superficie de bosque nativo en el área de estudio no ha tenido variaciones significativas. La evolución de la variación puede verse en el siguiente gráfico (Fig. 9):

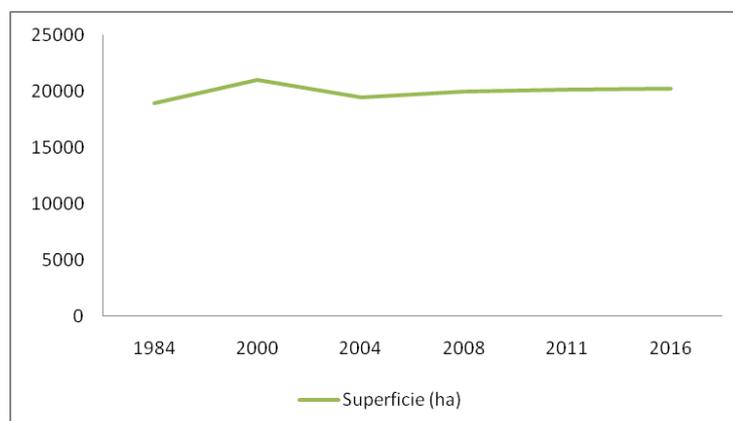


Fig. 9 - Evolución de la superficie de bosque nativo 1984-2016

Cabe consignar que los datos de los que disponemos son globales para toda el área de estudio, por lo que no tenemos información sobre los cambios concretos en cada porción del territorio. Un estudio pormenorizado de esta variable podría arrojar resultados interesantes sobre la dinámica del bosque nativo. Conocer si la superficie global se mantiene estable porque no se registran cambios o porque se registran disminuciones y extensiones en distintas porciones del territorio pero se compensan de manera global.

Según puede verse en las matrices de confusión (Tablas 3 a 8) la precisión en la clasificación global se situó en valores similares para todos los procesos de clasificación: 74.1%, 77.8%, 76.1%, 77.0%, 76.8%, 83.3%. Aunque siendo levemente inferior para el año 1984 y levemente superior para el año 2016 (Tabla 11):

Año	Precisión (%)
1984	74.1
2000	77.8
2004	76.1
2008	77.0
2011	76.8
2016	83.3

Tabla 11 - Precisión de la clasificación según año

Este indicador expresa la precisión en términos genéricos y se calcula como el cociente entre la suma de los puntos de referencia clasificados correctamente y el total de puntos de referencia, expresado en porcentaje. De alguna manera sintetiza los datos generados a partir de la matriz de confusión de manera global, en un único valor de precisión.

Por otra parte, la cantidad de puntos sin clasificar se situó en los siguientes valores porcentuales, respectivamente para cada año de estudio: 20.9%, 19.3%, 20.0 %, 13.5 %, 17.30 %, 7.9 % (Tabla 12):

Año	Puntos sin clasif. (%)
1984	20.9
2000	19.3
2004	20.0
2008	13.5
2011	17.3
2016	7.9

Tabla 12 - Porcentaje de puntos sin clasificar según año.

Según se desprende también de las matrices de confusión, los errores de clasificación más frecuentes fueron entre las clases bosque nativo y bosque plantado. En el año 1984 ambos valores son bajos. En las clasificaciones de los años 2000 y 2008 fue mayor el error de omisión de bosque nativo en favor de bosque plantado (7.3 y 6.3% para los años 2000 y 2004 respectivamente y se dispara a 28.9% para el año 2008). En el año 2011 fueron similares ambos errores (9.0 % de omisión en bosque nativo y 12.6% de omisión en bosque plantado). Pero en 2016 fue mayor el error de omisión de bosque plantado en favor del bosque nativo (25 %).

Año	Omisión nativo (%)	Omisión plantado (%)
1984	1.44	4.50
2000	7.32	0.00
2004	6.31	4.71
2008	28.99	7.77
2011	9.00	12.59
2016	7.58	25.00

Tabla 13 - Errores de omisión de nativo en favor de plantado y viceversa.

Este problema fue detectado como uno de los más significativos de esta metodología de clasificación. Una característica del bosque plantado es la diversidad de estados de crecimiento según las fechas de relevamiento, que en determinadas etapas asemeja la respuesta espectral a la de bosque nativo y en otras se distingue claramente. Esta situación potencia los errores de clasificación entre esas dos coberturas.

El otro problema detectado tiene que ver con la resolución espacial de las imágenes Landsat en relación al tipo de cobertura del área de estudio. Una característica particular dentro toda la cuenca, pero más especialmente dentro del área finalmente estudiada -zona suroeste-, es la fragmentación de la superficie con diferentes coberturas en zonas pequeñas. Por lo tanto, el uso de un sensor como Landsat, con una resolución espacial de 30 x 30 m 'disuelve' superficies fragmentadas menores a esa área o 'invisibiliza' sectores de superficie cuyo cambio de cobertura ocurre en un sector del pixel. Este fenómeno implica necesariamente un aumento del error en la clasificación que es muy difícil cuantificar pero sin lugar a dudas está presente.

Por último, se realizó un análisis comparativo con otras fuentes de datos (LCCS, DGF) donde se constató que los datos globales de superficie de

bosque nativo son -en términos generales- similares para cada año de estudio. Los datos de cobertura del LCCS corresponden a los años: 2000, 2008, 2011, 2015 y los de la DGF al año 2011 (Tabla 14):

Año	Proyecto	LCCS	DGF
1984	18927		
2000	21021	22046	
2004	19441		
2008	19936	21725	
2011	20110	21680	22187
2016	20252	20619	

Tabla 14 - Superficie de bosque nativo según año y fuente (ha)

Para el año 2000 la diferencia entre la superficie de bosque nativo relevada por el LCCS respecto a la del proyecto registra una variación porcentual del 4.8 %. Para el año 2008 esa diferencia es de 8.9 %. En el año 2011 se cuenta con datos de las tres fuentes y la diferencia de superficie relevada es de 10.3 % para los datos de DGF y 7.8 % para LCCS, ambos respecto de los relevados por el proyecto. Para el año 2016 se registra la menor diferencia entre los datos del LCCS y el proyecto, con una variación porcentual de la superficie del 1.8 %.

Cuando se superponen ambas capas de datos puede verse la fuerte correlación espacial de los datos de las distintas fuentes. En la fig. 10 un ejemplo de comparación de la cobertura de bosque nativo relevada por el proyecto y por el LCCS para un sector de la cuenca.

Para finalizar, reflexionando sobre las posibilidades de profundización que se podrían abrir a partir de este proyecto, se pueden vislumbrar tres líneas de investigación.

Por un lado, como se menciona al inicio de las conclusiones, dado que los resultados globales sobre la superficie de bosque nativo para la cuenca no arrojan cambios significativos, sería interesante realizar un estudio de los cambios registrados por porción del territorio. De esta manera, se podría realizar un acercamiento pormenorizado a la dinámica del bosque nativo a lo largo del tiempo, más allá de los datos genéricos de cobertura.

Por otro lado, la realización de un estudio de cobertura similar al de este proyecto pero con imágenes de menor resolución espacial podría generar insumos para medir la influencia del tamaño del pixel de Landsat en el

estudio de territorios con una amplia fragmentación de sus coberturas como el que fue objeto de este proyecto.

Por último, analizando la cobertura de suelo urbano, se puede constatar un aumento sostenido de esta cobertura a lo largo del período estudiado. Por este motivo, una posible línea de investigación complementaría sería un análisis de correlación de los datos de superficie urbana con datos socio-demográficos de estas zonas, lo que podría arrojar resultados interesantes sobre el crecimiento de las ciudades, la movilidad habitacional, entre otros.

COMPARATIVO COBERTURA BOSQUE NATIVO CON LCCS

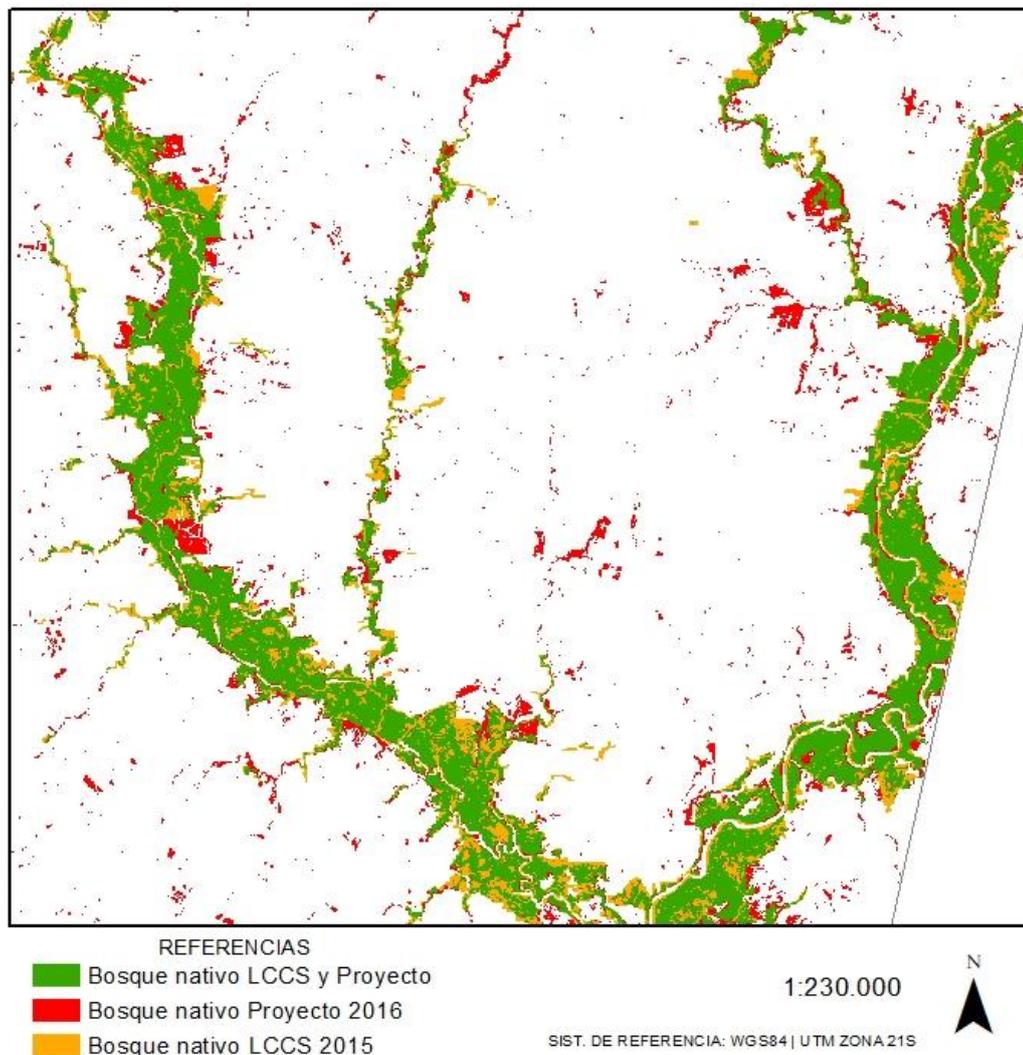


Fig. 10 - Mapa comparativo cobertura bosque nativo con LCCS

BIBLIOGRAFÍA

AMBROSIO, G. et al. (s/d). Documento técnico: "Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal". Universidad de Málaga.

AMIEVA, P. (2016). "Manual de usuario: SoPI, Software de Procesamiento de Imágenes. Versión 3.0". Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

ARZARENA VILLAR, A. (s/d). "Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes". *Disponible en:*
https://www.academia.edu/8032385/TELEDETECCI%C3%93N_Y_SISTEMAS_DE_TRATAMIENTO_DIGITAL_DE_IM%C3%81GENES (Accedido 30/08/2019).

ATIENZA, V. "El histograma de una imagen digital" (2011). Universidad Politécnica de Valencia.

CANNEVA, N.; BERMÚDEZ, H. (2009). "Pautas para la presentación de trabajos". Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, UdelaR.

CHANDER, G. et al. (2009). "Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors". Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.007.

CHAVEZ, P. S. (1996). "Image-based atmospheric corrections, Revisited and improved". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 62 (Pág. 1025-1036).

CHUVIECO, E. (1995, 2ª edición). "Fundamentos de Teledetección Espacial". Ediciones Rialp S.A., Madrid. ISBN: 84-321-2680-2.

CHUVIECO, E. (2008, 3a edición). "Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio". Editorial Ariel S.A., Barcelona. ISBN: 978-84-344-8073-2008.

CHUVIECO, E. et al. (2008). "Propuesta de procesado de imágenes Landsat y evaluación de algunos aspectos en zonas piloto para el PNT". Departamento de Geografía, Universitat Autònoma de Barcelona. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá.

CHUVIECO, E. y HANTSON, S. (2010). "Documento técnico de los algoritmos a aplicar sobre las imágenes de satélite de media resolución". Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá (UAH).

Department of the Interior, U.S. Geological Survey (2017). "Product Guide: Landsat 4-7 Surface Reflectance (LEDAPS) Product". Versión 8.0

GARCÍA RODRÍGUEZ, M. et al. (2012). "Guía práctica de teledetección y fotointerpretación". Dpto. Análisis Regional y Geografía Física, Universidad Complutense de Madrid.

GILABERT, M. A. et al. (1994). "An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectance from TM images". International Journal of Remote Sensing, Vol. 15, N° 10 (Pág. 2065-2086).

HANTSON, S. et al. (2011). "Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección". Revista de Teledetección No. 36 (pág. 51-61). Asociación Española de Teledetección. ISSN: 1988-8740.

JARAMILLO, L.; ANTUNES, A. (2018). "Detección de cambios en la cobertura vegetal mediante interpretación de imágenes Landsat por redes neuronales artificiales (RNA). Caso de estudio: Región Amazónica Ecuatoriana". Revista de Teledetección No. 51 (pág. 33 a 46), Asociación Española de Teledetección. ISSN: 1133-0953.

MIRAGLIA, M. et al. (2010). "Manual de Cartografía, Teleobservación y Sistemas de Información Geográfica". Laboratorio de SIG, Instituto del Conurbano, Universidad Nacional de General Sarmiento. ISBN 978-987-630-090-2.

ORDÓÑEZ, A.; SERNA, J. (2015). "Análisis superficial y multitemporal de imágenes Landsat, Proyecto carbonífero La Luna entre los años 2001 y 2015". Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Especialización en Sistemas de Información Geográfica.

SENDRA, V. et al. (2015). "Método para la corrección atmosférica de imágenes Landsat". Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos, XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección (pág. 484-487).

SCHMIDT, C. y MC CULLUM, A. (2018). Materiales del curso en línea: "La Evaluación de la Precisión de una Clasificación de la Cubierta Terrestre". ARSET (Applied Remote Sensing Training), NASA.