



ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA VEGETAL Y
FRAGMENTACIÓN EN EL CORREDOR DE CONSERVACIÓN
COMUNITARIA EL ÁNGEL - BOSQUE GOLONDRINAS,
PROVINCIA DEL CARCHI (1996 - 2005)**

POR

CARLOS EDUARDO PONCE VILLACÍS

Proyecto presentado como requisito parcial para la obtención del título de:

INGENIERO GEOGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE

DIRECTOR: Ing. Wilson Jácome

CODIRECTOR: Ing. Alexander Robayo

SANGOLQUI – ECUADOR

2008

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente Proyecto de Grado titulado “**ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA VEGETAL Y FRAGMENTACIÓN EN EL CORREDOR DE CONSERVACIÓN COMUNITARIA EL ÁNGEL - BOSQUE GOLONDRINAS, PROVINCIA DEL CARCHI (1996 - 2005)**” fue realizado en su totalidad por la Sr. Carlos Eduardo Ponce Villacís, bajo nuestra dirección.

Ing. Wilson Jácome

DIRECTOR

Ing. Alexander Robayo

CODIRECTOR

RESUMEN

El incremento antropogénico y la falta de proyectos sustentables ha generado deterioro entre las reservas existentes del Ecuador; éste es el caso del corredor de conservación comunitaria entre la Reserva Ecológica de El Ángel y el Bosque Protector Golondrinas, provincia del Carchi.

El presente estudio determina los cambios de cobertura producidos en la zona entre los años 1996 y 2005, utilizando distintos métodos y técnicas de análisis multitemporal, con imágenes satelitales previamente tratadas (correcciones atmosféricas, radiométricas, geométricas, entre otras). Además, se aplica la metodología de Steenmans y Pinborg con el fin de identificar el índice de fragmentación para el año 2005.

Los cambios de cobertura e índice de fragmentación constituyen información cuantitativa y cualitativa importante, que una vez representadas en mapas y datos estadísticos, servirán como una herramienta valiosa para plantear proyectos de conservación en las zonas más intervenidas.

ABSTRACT

The Anthropogenic increase and the lack of sustainable projects have triggered deterioration among the existing Ecuadorian ecological reserves; that is the case with the community ecological corridor between " Reserva Ecológica de El Ángel " and the "Bosque Protector Golondrinas" natural areas, located in the Carchi province.

This study determines the zone coverage changes produced between 1996 and 2005, using different satellite images multi-temporary analysis methods and techniques. The images are previously treated with atmospheric, radiometric and geometric alterations. In addition, Steenmans and Pinborg methodology is applied to identify the fragmentation index by the year of 2005.

The coverage and fragmentation index changes are important qualitative and quantitative information. Once this information is represented in maps and statistical information they will be a valuable tool to define conservation projects in the most affected zones.

DEDICATORIA

“No existen más palabras que las que el viento pueda pronunciar cuando la libertad está cerca de la cumbre”.

Por las consecuencias sin perdón de tu ausencia que el presente reclama....Ñaña Zoila.

A mis Padres, con quienes vivo eternamente

A ti primo, Ovito, por darme esa confianza que tanta falta me hizo, entendiendo que la vida es más un carisma espiritual que profesional, siempre viste en mi un gran potencial donde poco a poco lo he ido cultivando.

A la persona que desde el primer día de clase estuvo a mi lado en donde mi vida eterna vuelve contigo, demasiado pronto o demasiado tarde, pero siento la sensibilidad de mi alma cuando la razón es demasiado legible en tu corazón, salvándome, para ti, Quilla.

A mis Amigos de cordada en la montaña, de viajes fantasmales sin rumbo, de momentos únicos, a todos los poetas, escaladores, escritores, cantantes, revolucionarios, que expresan lo que sienten y mueren luchando por su ideal.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue auspiciada por la Fundación John D. and Catherine T. MacArthur ejecutada por la Corporación Grupo Randi Randi.

Quiero agradecer a la Corporación Grupo Randi Randi, por darme la oportunidad de iniciarme profesionalmente y abrirme pautas para seguir haciéndolo.

Agradezco mucho a todos quienes me apoyaron en las dificultades adversas en el desarrollo de este proyecto, en especial a Telma, David, Pao, Cesar y uno muy apreciado a Carlita por ayudarme a comprender todos los matices del vivir a través del proyecto.

A todos los colegas y amigos del Carchi.

A los compañeros del Pueblo Ancestral Kichwa Kawsac Sacha con quienes comparto mis experiencias laborales últimamente.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
SIGLAS Y DEFINICIONES UTILIZADAS	XV
CAPÍTULO I.....	1
DESCRIPCIÓN GENERAL	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.4 UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	5
1.5 CARACTERÍSTICAS GENERALES E IMPORTANCIA	6
CAPÍTULO II.....	9
MARCO CONCEPTUAL	9
2.1. INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN.....	9
2.2. CAMBIOS DE COBERTURA	13
2.2.1 FACTORES IMPORTANTES PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA.....	14
2.2.2 REQUISITOS PREVIOS PARA EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL.....	16
2.2.2.1 <i>Ajuste geométrico</i>	16
2.2.2.2 <i>Homogenización radiométrica</i>	16
2.2.3 TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA	17
2.3. ÍNDICE DE VEGETACIÓN	18
2.4. FRAGMENTACIÓN	20
2.4.1 ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN.....	22
CAPÍTULO III.....	25
ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	25
3.1 CONSIDERACIONES PREVIAS PARA EL DESARROLLO DEL ESTUDIO.....	25
3.2 TRATAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES.....	28
3.2.1. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA.....	29
3.2.2. ÁREA DE ESTUDIO.....	30

3.2.3.	CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA.....	31
3.2.3.1	<i>Restauración de líneas o píxeles perdidos.....</i>	31
3.2.3.2	<i>Corrección del Bandeado de la imagen.....</i>	32
3.2.3.3	<i>Cálculo de reflectividad.....</i>	33
3.2.3.4	<i>Correcciones Atmosféricas.....</i>	34
3.2.4.	NORMALIZACIÓN RELATIVA DE LAS IMÁGENES POR EL MÉTODO DE AJUSTE LINEAL.....	37
3.2.5.	CORRECCIONES TOPOGRÁFICAS.....	39
3.3	TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA	40
3.3.1.	COMPOSICIONES DE COLOR MULTITEMPORAL.....	40
3.3.2.	DIFERENCIA ENTRE LAS IMÁGENES.....	43
3.3.3.	COCIENTE MULTITEMPORAL	46
3.3.4.	REGRESIÓN LINEAL MULTITEMPORAL.....	50
3.4	FRAGMENTACIÓN DE STEENMANS Y PINBORG.....	51
3.4.1.	LEYENDA DE CLASIFICACIÓN	52
3.4.2.	ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN	54
CAPÍTULO IV		58
RESULTADOS.....		58
4.1	CAMBIOS DE COBERTURA.....	58
4.1.1.	COMPOSICIÓN MULTITEMPORAL.....	58
4.1.2.	DIFERENCIA MULTITEMPORAL.....	62
4.1.3.	COCIENTE MULTITEMPORAL.....	63
4.1.4.	REGRESIÓN LINEAL	65
4.2	ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN	68
CAPÍTULO V		70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		70
5.1	CONCLUSIONES.....	70
5.2	RECOMENDACIONES.....	73
ANEXOS		74
1.	CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS SATELITALES.....	74
2.	CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES SATELITALES ADQUIRIDAS	75
3.	PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES	76
4.	MOSAICO DE LAS IMÁGENES SATELITALES DURANTE EL PROCESO DE TRATAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES.....	77

5. MEDIA DE LOS VALORES DE REFLECTANCIA PARA CADA BANDA POR MUESTRAS PSEUDO INVARIANTE.....	78
6. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE LA REGRESIÓN LINEAL (MÍNIMOS CUADRADOS)	79
7. VALORES DE REFLECTIVIDAD NORMALIZADA POR EL AJUSTE DE REGRESIÓN LINEAL	80
8. MAPAS	81
REFERENCIAS	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cadencia de actualización para estudios multitemporales (Chuvienco 2002)	15
Tabla 2 .Imágenes satelitales adquiridas.....	26
Tabla 3. Unidad Mínima de Mapeo	27
Tabla 4. Clases de cobertura en el área de estudio	52
Tabla 5. Clasificación de la fragmentación según el valor del índice.....	57
Tabla 6. Media y desviación estándar de la diferencia multitemporal entre imágenes.....	62
Tabla 7. Umbral de cambio de la diferencia multitemporal entre imágenes.....	63
Tabla 8. Índices de Fragmentación del Área de Estudio.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Ubicación de la zona de estudio	5
Figura 2. Recursos hídricos de la zona de estudio (GPC)	6
Figura 3. Vegetación característica de la zona de estudio (GPC)	7
Figura 4. Fauna característica de la zona de estudio (Fuente propia)	7
Figura 5. Características sociales de la zona de estudio (GPC)	8
Figura 6. Elementos de un proceso de teledetección (Tutorial de Teledetección- Dr Manuel Arbelo)	9
Figura 7. Espectro Electromagnético (CLIRSEN)	11
Figura 8. Respuestas espectrales típicas	19
Figura 9. Procesos de Fragmentación.....	21
Figura 10. Georeferenciación de las imágenes satelitales.....	29
Figura 11. Límite del área de estudio en la Imagen Satelital ASTER 2007	31
Figura 12. Corrección del ruido	32
Figura 13. Corrección del bandeo.....	33
Figura 14. Modelo desarrollado para la corrección atmosférica (Método de Chávez)	37
Figura 15. AOs de zonas pseudos invariantes	38
Figura 16. Esquema de una composición de color multitemporal	40
Figura 17. Comparación de color multitemporal	41
Figura 18. Comparación de color multitemporal con nubes y sombras enmascaradas.....	42
Figura 19. Composición de color multitemporal entre la banda 4.....	42
Figura 20. Diferencia entre NDVI de 2007 y 1991	44
Figura 21. Histograma de la imagen de diferencia entre 2007 - 1991	44

Figura 22. Ejemplo para calcular un índice de fragmentación (Steenmans y Pinborg)	51
Figura 23. Grilla de cálculo (Troche, 2001)	55
Figura 24. Composición de color multitemporal NDVI (El Ángel).....	58
Figura 25. Composición de color multitemporal BANDA 4 (El Ángel)	59
Figura 26. Características visuales en la composición de color multitemporal del área de estudio	60
Figura 27. Composición de color multitemporal regeneración del suelo descubierto	61
Figura 28. Histograma de diferencia multitemporal entre las imágenes del 2007 - 1991	62
Figura 29. Cociente multitemporal con y sin expansión lineal	64
Figura 30. Cociente Multitemporal entre NDVI del 2007 y 1991	64
Figura 31. Imagen NDVI2007/NDVI1991 en porcentajes aproximados de cambio de cobertura	65
Figura 32. Aplicación del método de Regresión Lineal en el análisis multitemporal de las imágenes de 1991 y 2007	66
Figura 33. Regresión multitemporal; en la imagen de los residuales se señalan con círculos los cambios más evidentes.....	67
Figura 34. Mapa de Áreas Naturales y Antropizadas	68

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cociente simple entre las bandas.....	19
Ecuación 2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index).20	
Ecuación 3. Índices Estructurales simples para la cuantificación del cambio de cobertura.....	23
Ecuación 4. Formula utilizada para la obtención de índices de fragmentación	23
Ecuación 5. Calculo de reflectividad (Chavez, 1996)	36
Ecuación 6. Modelo matricial de mínimos cuadrados.....	38
Ecuación 7. Diferencia entre imágenes multitemporal	43
Ecuación 8. Umbral de cambio de cobertura	45
Ecuación 9. Formula de la distribución Gaussiana aplicada a la diferencia multitemporal	45
Ecuación 10. Cociente multitemporal	46
Ecuación 11. Índice de cociente multitemporal normalizado	46
Ecuación 12. Expansion lineal de los valores digitales	48
Ecuación 13. Nivel Porcentual de los valores de cociente multitemporal en escala logaritmica.....	49
Ecuación 14. Regresión lineal multitemporal.....	50
Ecuación 15. Residuales de la regresión multitemporal.....	50
Ecuación 16. Índice de Fragmentación de Steenmans y Pinborg	51

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Metodología General	25
Diagrama 2. Tratamiento Digital de las Imágenes.....	28
Diagrama 3. Metodología para el cálculo de índice de fragmentación de Steenmans y Pinborg	51

SIGLAS Y DEFINICIONES UTILIZADAS

AOI.- Abreviación de *Area Of Interest* (modulo de ERDAS 8.4). Comando que permite el control de las propiedades del área de interés en las imágenes.

Aspecto Biofísico.- Características bióticas y abióticas; ejemplo: Vegetación, agua, temperatura, etc.

Biogeografía.- Es la ciencia que estudia la distribución de los seres vivos sobre la Tierra, así como los procesos que la han originado, que la modifican y que la pueden hacer desaparecer.

CGRR.- Corporación Grupo Randi Randi.

CLC (CORINE Land Cover).- El proyecto CORINE (*Coordination of Information on the Environment Land Cover*) desarrolla la creación de una base de datos sobre la cobertura y uso del territorio en la Unión Europea.

CLIRSEN.- Abreviación de *Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos*. Es una base espacial ubicada en los límites de las provincias de Pichincha y Cotopaxi, en Ecuador.

ECOLAP.- Instituto de Ecología Aplicada.

Efectos Antrópicos.-Efecto causado por o para el hombre.

Fenología.- Estudio de la relación entre los factores climáticos y los ciclos de los seres vivos.

GAP.- Terminología inglesa entre cuyas múltiples acepciones figura la de "hueco", "espacio", "brecha", etc. Especialmente utilizada en la fragmentación de hábitats.

Georeferenciación.- Es una técnica que nos permite ubicar un objeto en cualquier sistema de coordenadas.

GPC.- Gobierno Provincial del Carchi.

IGM.- Instituto Geográfico Militar.

L1B.- El pre procesamiento de nivel L1B de las imágenes satelitales ASTER, consiste en aplicar parámetros de correcciones radiométricas y geométricas.

MAE.- Ministerio del Ambiente del Ecuador.

ND.- Abreviación de *Nivel digital*, representa un valor numérico asignado a cada píxel.

NDVI.- Abreviación de las siglas en inglés Normalized Difference Vegetation Index. Es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación en base a la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja..

PCCC.- Proyecto de Conservación de Corredor Comunitario

Píxel.- Es la menor unidad en la que se descompone una imagen digital.

Radiación Electromagnética.- Es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

Resolución Temporal Satelital.- Periodicidad con la que el satélite adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre.

Teledetección.- Es la técnica que permite obtener información sobre un objeto, superficie o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con él.

Z (distribución Gaussiana).- Indica el número de desviaciones típicas que esa observación se separa de la media del grupo de observaciones.

FUENTES:

Wikipedia (<http://es.wikipedia.org/wiki/>); Chuvieco, 2002.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN GENERAL

1.1 INTRODUCCIÓN

El Ecuador es considerado como uno de los lugares de mayor concentración de biodiversidad del planeta, esto se debe a su amplia gama de climas en sus cuatro regiones. Es así que, se han formado miles de especies de flora y fauna en medio de extensos territorios naturales, muchos de los cuales están protegidos por el Estado.

“Carchi, tierra de contrastes desde la Cuenca del Río Mira hasta los fríos páramos del Chiles” (GPC), gente de sangre libertaria con su amplio campo de biodiversidad, cautiva a forjar un manejo sustentable de todos sus recursos, estableciendo proyectos de conservación donde puedan vivir las generaciones posteriores sin preocuparse por la cantidad que les sobra o les falta.

Las áreas naturales más importantes que posee la provincia del Carchi son la Reserva Ecológica de El Ángel y el Bosque Protector Golondrinas; esto se debe a que cuentan con importantes fuentes hídricas y una gran biodiversidad. Entre dichas áreas existe una conectividad biológica que también ha fomentado a su conservación denominándolo corredor comunitario; que además de su riqueza en biodiversidad, también posee una variedad cultural en sus habitantes que han permanecido durante años dentro o cerca de las áreas naturales, siendo los únicos testigos de las transformaciones en el transcurso del tiempo.

La riqueza en biodiversidad de la zona, ha sido afectada por la constante intervención humana sobre los paisajes naturales; es por esto que la

fragmentación de hábitats y cambios de cobertura ha generado consecuencias de pérdida de especies de flora y fauna.

Los estudios de fragmentación de hábitats y cambios de cobertura, constituyen una herramienta para conocer los diferentes tipos de problemas del ecosistema, provocados de manera antrópica o natural, y de esta manera obtener soluciones que puedan conllevar una armonía en el desarrollo entre el hombre y la naturaleza.

1.2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Los corredores de conservación comunitaria son importantes ya que involucran a las áreas protegidas y a los habitantes del sector; además, es el modo óptimo para la subsistencia del desarrollo sostenible evitando la destrucción de la biodiversidad. Por lo tanto, son una de las mayores prioridades de conservación en el ámbito regional y mundial en muchos de los ecosistemas críticos y áreas naturales existentes.

En América del Sur se están efectuando numerosos corredores biológicos y de conservación, donde existen diferentes diseños en términos de sus objetivos, escala, marco conceptual, metodologías, organizaciones involucradas, apropiación social, etc.

El enfoque conservacionista del sector es valorado por las características biológicas, culturales y sociales de la región fomentando así la sustentabilidad del corredor comunitario donde se involucre cada uno de los aspectos.

Es conocido que los espacios naturales protegidos y aislados, por bien diseñados y gestionados que estén, resultan insuficientes para conservar la biodiversidad y para cumplir muchas otras funciones ecológicas y sociales importantes (Forman y Godron, 1986).

Para la elaboración de proyectos con enfoque conservacionista, los análisis metodológicos son múltiples y variados. Por el mismo hecho se deben conectar simultáneamente con los requisitos y elementos que se dispone por lo cual es recomendable fundar bien las bases y lineamientos del proyecto a desarrollarse.

El uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica se encuentra cada vez más extendido dentro de la biología de la conservación, ya que facilita el desarrollo de proyectos en zonas poco accesibles, disminuye su tiempo de elaboración y los resultados obtenidos concuerdan con los objetivos planteados.

Se han realizado estudios en los cuales se proponen metodologías, que analizan las consecuencias y efectos que produce el cambio de cobertura y fragmentación ecológica, donde su gran influencia de vínculo se basa con el paisaje terrestre e hidrológico, interactuando simultáneamente.

El análisis de cambio de cobertura y fragmentación de hábitat es una herramienta metodológica flexible utilizada para determinar, estimar y cuantificar áreas que han sido intervenidas.

En la Reserva Ecológica El Ángel y el Bosque Protector Golondrinas, existen hábitats que están severamente amenazadas, es por este motivo que la Corporación Grupo RANDI RANDI (CGRR), ha desarrollado el Proyecto de Conservación de Corredor Comunitario (PCCC), cuyo fin es el de desarrollar investigaciones y proyectos de conservación en la zona.

Este estudio contribuye al PCCC para analizar el cambio de cobertura y fragmentación ecológica, en donde se identifican las zonas de mayor intervención con el fin de priorizarlas y así formular futuros proyectos de conservación.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Determinar el cambio de cobertura utilizando técnicas de análisis multitemporal entre los años de 1996 - 2005 e índice de fragmentación para el año 2005 en el corredor de conservación comunitaria El Ángel – Bosque Golondrinas, provincia del Carchi.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar el tratamiento digital de las imágenes satelitales para su posterior análisis e interpretación.
- Detectar cambios de cobertura en la zona de estudio entre los años 1996-2005, aplicando distintos tipos de técnicas y metodologías.
- Adaptar la metodología de Steenmans y Pinborg al área de estudio para identificar el índice de fragmentación en el año 2005.
- Desarrollar un diagnóstico de fragmentación del área de estudio.
- Plantear mediante los resultados obtenidos, áreas prioritarias de estudio para el Proyecto de Conservación de Corredor Comunitario.

1.4 UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en el norte del Ecuador, en la provincia del Carchi. Su ubicación política administrativa corresponde a los cantones Espejo, Mira, Montufar y Tulcán. Comprendida entre La Reserva Ecológica El Ángel y el Bosque Protector Golondrinas (Ver Anexo 8, Mapa 1).

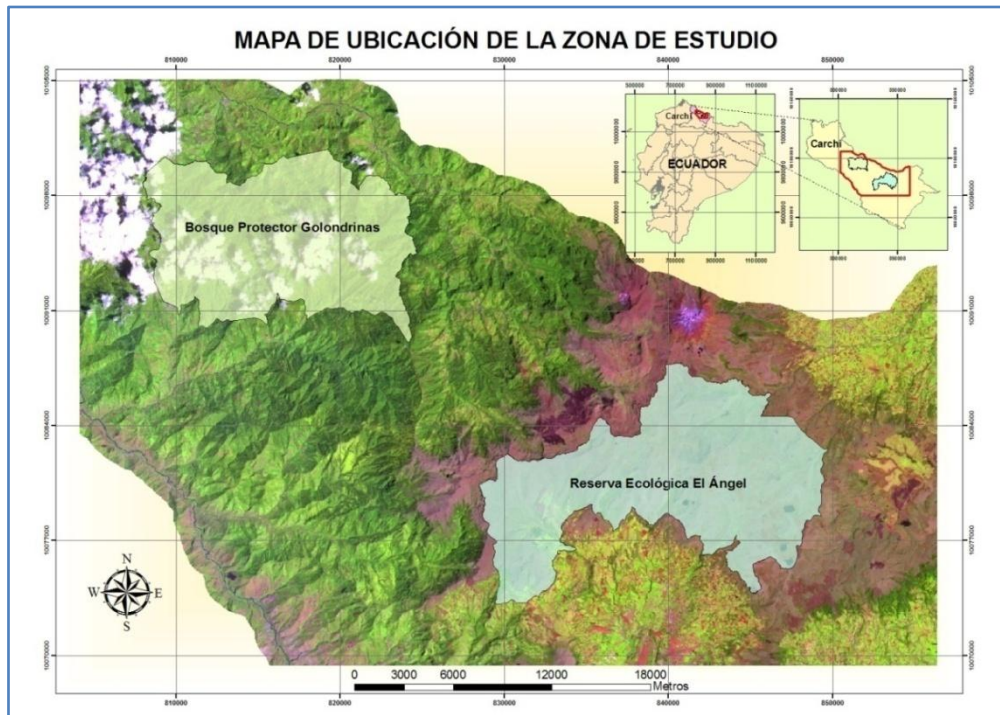


Figura 1. Mapa de Ubicación de la zona de estudio

El área de investigación tiene un perímetro aproximado de 164.300 metros y un área de 140.000 hectáreas, entre las siguientes coordenadas UTM / WGS 84 Zona 17:

Ubicación	Coordenada
Norte	10105000
Sur	10070000
Este	856000
Oeste	804000

Situada en la cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos, limita al oeste con la Reserva Étnica Awá. El Bosque Protector Golondrinas se localiza cerca de las poblaciones de Hualchán y Guallupe, mientras que la Reserva Ecológica El Ángel es adyacente a las poblaciones de El Ángel y Mira.

1.5 CARACTERÍSTICAS GENERALES E IMPORTANCIA

En la Reserva Ecológica El Ángel la vegetación característica de la zona es el páramo de frailejones, mientras que en el Bosque Protector Golondrinas es el bosque andino. Entre estas dos reservas se encuentra una gran variedad de pisos climáticos donde presentan niveles altitudinales desde los 1200 metros en la zona del valle, hasta los 3600 msnm en la zona del páramo del El Ángel, lo cual determina la diversidad de la vegetación y de la presencia de zonas de producción agrícola. La temperatura promedio oscila entre 4° C en los páramos y los 22,9° C en el sector bajo (GPC).

En el corredor de conservación comunitaria de La Reserva Ecológica El Ángel y el Bosque Protector Golondrinas existe gran variedad de elementos bióticos y abióticos básicos para el sustento del sector. Por ejemplo, las fuentes de agua como ríos, lagunas, cascadas, humedales, ciénegas, etc., son muy importantes para el consumo de las comunidades.



Figura 2. Recursos hídricos de la zona de estudio (GPC)

Además existen distintas formaciones vegetales de páramos y bosques, entre ellos: el páramo de frailejones, humedales, bosque siempre verde montano y

montano alto; donde habitan gran cantidad de especies que son amenazadas si las zonas de distribución son reducidas; esto hace que sean vulnerables a la extinción de igual manera para flora endémica. “La fragmentación de los bosques ha diversificado y ha influido en el desarrollo de nuevas especies por evolución por este motivo están limitadas a un mismo lugar” (Denise Donoso 2005).



Figura 3. Vegetación característica de la zona de estudio (GPC)



Figura 4. Fauna característica de la zona de estudio (ECOLAP y MAE, 2007)

La mayor parte de la población que vive en el corredor de conservación comunitaria se dedica a la agricultura, debido a que sus suelos son fértiles; entre los cultivos más importantes se destaca la papa, caña de azúcar, frejol, mellocos, tomate, etc.

Varias instituciones han desarrollado proyectos para definir la importancia del corredor y así tomar las medidas adecuadas para la conservación de sus recursos, en donde han tomado en cuenta características como la gran diversidad de especies animales y vegetales endémicas de la zona, el valor hidrológico y la riqueza cultural de las comunidades, donde prevalecen las tradiciones, mitos, leyendas, música, etc.



Figura 5. Características sociales de la zona de estudio (GPC)

El principal problema que afecta el área de investigación, es la expansión de prácticas agrícolas y ganaderas por parte de propietarios privados y comunales, generando actividades no adecuadas como quemas no controladas, introducción de especies exóticas, escasez de agua en la región, entre otros.

Por todos estos factores, es muy importante realizar estudios entre las áreas determinando la importancia y funcionamiento vital de los recursos naturales.

CAPÍTULO II

MARCO CONCEPTUAL

2.1. INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN

La teledetección se basa en obtener información de la superficie terrestre a distancia sin entrar en contacto con ella captando propiedades de radiación electromagnética. Todos los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral propia, de esta manera la teledetección estudia las características terrestres a nivel de las variaciones espectrales además de las espaciales y temporales.

En la siguiente figura se puede ver el proceso de captura de imágenes de la superficie terrestre:

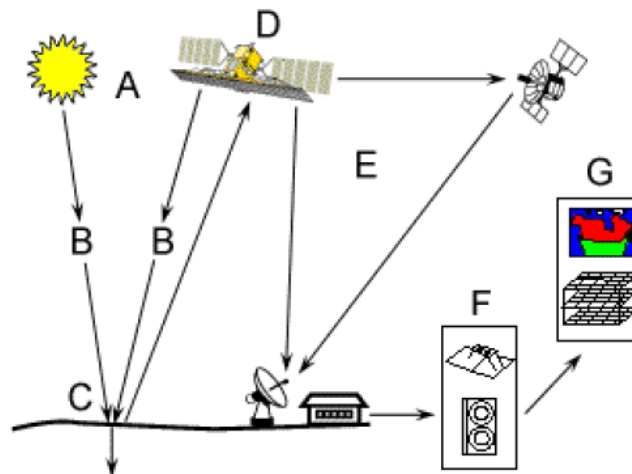


Figura 6. Elementos de un proceso de teledetección (Dr Manuel Arbelo)

- A. Fuente de Energía: Se debe disponer de una fuente de energía que ilumine o provea radiación electromagnética al objeto de interés, en este

- caso es el sol. (Existe también fuente de energía artificial que en algunos satélites vienen incorporados).
- B. Radiación y la atmósfera: La interacción entre la energía y la atmósfera se ve afectada tanto desde la fuente al objeto como del objeto al sensor.
- C. Interacción con el objeto: La energía interactúa con el objeto dependiendo de las propiedades de este y de la radiación incidente.
- D. Detección de energía por el sensor: Existen varios sensores remotos que recogen y graban la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto y la atmósfera.
- E. Transmisión, Recepción y Procesamiento: La energía almacenada por el sensor es transmitida a una estación de recepción y procesamiento donde los datos son convertidos a imágenes con sus respectivas correcciones (atmosféricas, geométricas, radiométricas, etc.).
- F. Interpretación y análisis: La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, para extraer la información requerida de la superficie terrestre.
- G. Aplicación: Se aplica la información extraída de las imágenes satelitales de la superficie terrestre para un mejor entendimiento del mismo ayudando a resolver un problema particular.

2.1.1 Campo Electromagnético

Por lo tanto, la teledetección se basa en adquirir información de un objeto sin estar en contacto físico con él. Esta información, se adquiere analizando los cambios que la superficie terrestre induce en su entorno, cuyas variantes se refiere a un campo electromagnético emitido o reflejado caracterizado por los siguientes elementos:

- Fuente o fuentes de la radiación electromagnética.
- Interacción de las ondas electromagnéticas con la superficie terrestre.
- Interacción de las ondas electromagnéticas con la atmósfera.
- Receptor o receptores de las ondas electromagnéticas.

Al considerar las ondas electromagnéticas como portadoras de información es necesario aclarar conceptos básicos para iniciar su análisis. Como su nombre lo indica, en dichas señales, existen dos vectores, el campo eléctrico y el magnético que viajan a través del vacío con distintas longitudes de onda.

El campo electromagnético es la distribución continua de los distintos tipos de longitudes de ondas y frecuencias existentes en la biosfera, estas longitudes van desde onda cortas y altas frecuencias hasta ondas largas y bajas frecuencias.

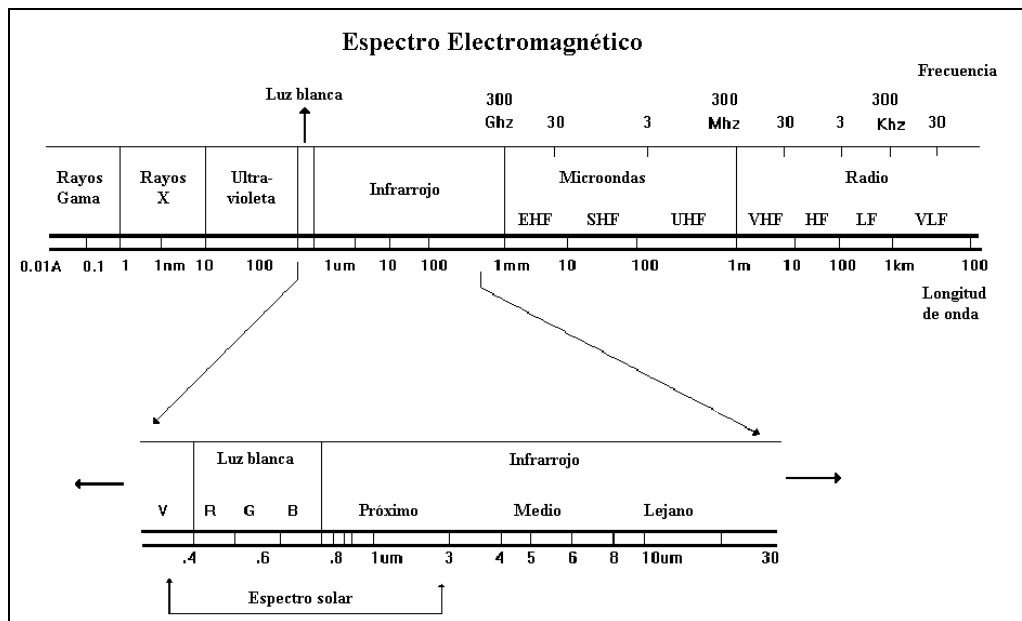


Figura 7. Espectro Electromagnético (CLIRSEN)

Los intervalos de longitudes de onda más utilizados en teledetección son la visible que comprende entre 0,4 - 0,7 micras, infrarrojo próximo, 0,7 - 1,3 micras, infrarrojo medio, 1,3 - 3 micras, y el infrarrojo térmico o lejano 7 - 15 micras.

Las bandas superiores a 10 cm de longitudes de onda son utilizadas por sensores activos como radares, sondas, altímetros, etc. Las bandas que le siguen son las de microondas que es la más utilizada por radiómetros, espectrómetros de microondas y sistemas de radar ya que presenta una longitud de onda hasta de 1mm.

Las bandas del infrarrojo lejano, medio y próximo comprende longitudes de ondas de 1mm hasta 0,7 micras, en esta región se produce gran parte de la radiación electromagnéticas, por lo tanto son las más utilizadas en el campo de la teledetección, espectrómetros, radiómetros, polarímetros y lasers.

En la región vecina al infrarrojo se encuentra la visible (0,4 a 0,7 micras) los cuales se componen del rojo, verde y azul (R, G, B siglas en ingles). Esta composición se lo realiza en las imágenes satelitales para la obtención del color real.

En la región del ultravioleta (0,4 micras a 300 Angstroms) se han utilizados primordialmente para estudios de atmosferas planetarias, o superficies sin atmosfera debido a la opacidad de los gases en estas pequeñas longitudes de onda y finalmente los rayos X (de 300 a 0,3 Angstroms) y gamma (menos de 0,3 Angstroms) que se utilizan comúnmente para explorar estructuras cristalinas, óseas, etc. (Ormeño, 2006).

2.1.2 Plataformas Satelitales

Toda estas longitudes de onda son captadas por sensores multiespectrales colocadas en plataformas de observación, que pueden ser aéreas o espaciales, donde captan varias longitudes de onda del espectro electromagnético, que son susceptibles de recibir y medir la intensidad de la radiación que procede del suelo y que permiten ser manipuladas para su interpretación.

Según Arbelo (2004), la observación sistemática de la tierra comienza con el lanzamiento del primer satélite meteorológico TIROS-I con una cámara de baja resolución espacial. La serie de satélites TIROS llamados NOAA, a partir de 1970, aún sigue vigente siendo el satélite NOAA-16 el último en situarse en órbita.

Los buenos resultados obtenidos en el estudio de los recursos naturales con las imágenes de los primeros satélites meteorológicos y las misiones

espaciales, contribuyeron para desarrollar varios proyectos con el fin de poner en órbita satélites con distintos tipos de sensores y resoluciones espaciales.

El sistema que se considera como pionero es el Programa de Observación Earth (Earth Resources Technology Satellites) diseñado por la NASA, conocido comúnmente como LANDSAT. El primer satélite de este proyecto llevaba un sensor (MSS; Multi Spectral Scanner) que mide reflectividad de la superficie terrestre en cuatro intervalos espectrales diferentes, situados entre 0,5 y 1,1 μm (Ormeño, 2006).

El último satélite de esta serie ha sido lanzado en el año de 1999 con un sensor con 7 canales que abarca desde el visible hasta el infrarrojo térmico y una resolución espacial de 30 metros, y un canal pancromático con 15 metros de resolución espacial.

A partir de los LANDSAT se han desarrollado varios proyectos internacionales, realizando miles de estudios con las imágenes que proporcionan los satélites.

Entre los más relevantes están los satélites de la NASA, SPOT francés, MOS japonés, RADARSAT canadiense, IRS indio, ERS de la Agencia Europea del Espacio, TERRA multinacional (en esta plataforma se encuentran las imágenes ASTER), entre otros (Arbelo, 2004).

2.2. CAMBIOS DE COBERTURA

Los cambios ocasionados en los ecosistemas terrestres en su mayoría se deben a la conversión en la cobertura del terreno, degradación de la tierra e intensificación en el uso de la tierra (Lambin, 1994). Los cambios en el uso del terreno son resultado de una compleja interacción entre el ser humano y el medio biofísico que actúan sobre un amplio rango de escalas espaciales y temporales.

Entender las transformaciones en el uso de la tierra, y las fuerzas sociales que las manejan es de mucha importancia para comprender, modelar y predecir el cambio del ambiente a nivel local, regional, así como para manejar y responder a este cambio (Meyer y Turner II 1994).

2.2.1 Factores importantes para la detección de cambios de cobertura

La teledetección espacial es una de las principales herramientas para el análisis de procesos dinámicos, en este caso el cambio de cobertura a través de periodos de tiempo, además una de las facilidades que presentan la tecnología espacial son los sensores situados en órbita. “Las imágenes satelitales constituyen una fuente valiosísima para estudiar los cambios que se producen en la superficie terrestre, ya sean debidos al ciclo estacional de las cubiertas, y a catástrofes naturales o a alteraciones de origen humano” (Chuvienco 2002).

Robin (1998), distingue dos elementos importantes dentro de la dinámica de un determinado fenómeno, la rapidez con que el fenómeno se produce que puede ir de pocas horas hasta varios años, y la pervivencia del cambio que indica la duración de los efectos del fenómeno. La resolución temporal de cada satélite es un factor importante al definir el tipo de estudio que se pretende hacer, en la actualidad existen una gran variedad de características orbitales desde pocos minutos para satélites meteorológicos geo-estacional hasta varias semanas para el análisis de recursos naturales con órbitas bajas.

Depende de todos estos factores para realizar el análisis del cambio multitemporal, duración, pervivencia y sensores satelitales, ya que en algunas metodologías se necesita que la observación sea continua mientras que otras requieren de un periodo estándar.

En la Tabla 1, se muestran los períodos de observación recomendables para cada uno de los diferentes tipos de fenómenos.

Tabla 1. Cadencia de actualización para estudios multitemporales (Chuvieco 2002)

Fenómeno	Periodo de Observación Recomendable
Dinámica atmosférica	15-30 minutos
Seguimiento de desastres	2-24 horas
Evaluación de desastres	1-7 días
Predicción de Cosechas	2-3 meses
Análisis de la deforestación	1-3 años
Actualización de mapas de cobertura	3-5 años
Dinámica urbana	5-7 años
Actualización de datos topográficos	10-20 años

En los estudios multitemporales es muy importante que el sistema del sensor proporcione imágenes con cobertura periódica, con las mismas condiciones de observación referente a la altura, hora y ángulo de adquisición. Todas las imágenes de los diferentes períodos se recomienda que sean del mismo sensor y de un rango espectral similar para cada banda y si existen imágenes de diferente sensor se debería realizar un tratamiento previo para el respectivo análisis.

2.2.2 Requisitos previos para el análisis multitemporal

Para la interpretación de las imágenes satelitales obtenidas por distintos sensores, se debe realizar un tratamiento con anterioridad para determinar las mismas coordenadas geográficas y comparar con una misma unidad de medida, por lo tanto requiere de una corrección geométrica y radiométrica (Chuvienco 2002).

2.2.2.1 Ajuste geométrico

Los errores de superposición de las imágenes son muy representativos en el momento de la interpretación multitemporal, todas las imágenes tienen que ajustarse con un gran nivel de detalle. Varios autores han demostrado que se requieren precisiones de ajuste superiores a 0.2 píxeles para asegurar un error inferior al 10% en la comparación multitemporal (Dai Khorram, 1998; Townshend et al., 1992).

Si no existe un buen nivel de correlación entre imágenes, al aplicar los métodos multitemporales, existirán errores de comisión u omisión, es decir se estarían suponiendo cambios donde no existe y viceversa. Por lo tanto para realizar un buen ajuste geométrico es importante tener una serie de puntos de control para la imagen de referencia que se realiza el ajuste.

A partir de la imagen de referencia se toman puntos entre las imágenes restantes tomando en cuenta los rasgos comunes como elementos hidrológicos, caminos, casas, etc., elegir todas estas características va depender de la resolución de la imagen.

2.2.2.2 Homogenización radiométrica

Uno de los principales fundamentos para realizar estudios multitemporales es combinar o integrar en el proceso varias imágenes correspondientes a distintas fechas, pero es muy importante tomar en cuenta que existen factores que alteran el valor de cada píxel; como los distintos estados fenológicos, ángulo

de toma de la imagen, día nublado, bruma, sombra, agua profunda, aguas claras, etc.

En consecuencia, es preciso homogenizar los niveles digitales de cada píxel de todas las imágenes, para ello existen modelos que calibran estos niveles digitales de modo absoluto transformando a medidas de reflectividad o parámetros físicos. Otra manera de homogenizar es mediante un ajuste matemático entre fechas es decir una corrección relativa.

En definitiva todas las metodologías para la homogenización radiométrica tienen como objetivo el asignar valores digitales del mismo rango espectral evitando los errores que comúnmente existen en la adquisición de las imágenes.

2.2.3 Técnicas para la detección de cambios de cobertura

Dentro del campo de la interpretación de imágenes, la detección de cambios de cobertura, resulta un gran compromiso en sustentar la variación que ha ocurrido o no, es decir evadir los errores de omisión, donde se tendría una carencia de información, y comisión o falsa alarma como se lo ha señalado anteriormente. Por lo tanto, la técnica que se aplique será la más conveniente para que los errores disminuyan dependiendo del objetivo del análisis.

Otro aspecto de interés en el análisis de cambios de cobertura hace referencia al tipo de transformaciones que pretenden delimitarse en una imagen, según se transformen los rasgos espectrales o espaciales (Robin, 1998); esto implica analizar, ya sea con valores de reflectividad o por tamaño de parcelas. Si se utiliza imágenes continuas se emplean técnicas cuantitativas como diferencias, regresiones, composición de color, etc.; mientras que para rasgos espaciales se compara entre imágenes previamente clasificadas.

Las técnicas empleadas en este estudio para el análisis multitemporal son de tipos cuantitativas, es decir sin una clasificación previa; dichas técnicas se describen brevemente a continuación:

- Composiciones de color multitemporal: Detecta áreas de cambio mediante el análisis visual de imágenes en color provenientes de varias fechas (Chuvieco 2002). La metodología se basa en mezclar las mismas bandas o índices de distintos años en los cañones R G B para su posterior análisis.
- Diferencia entre imágenes: Es una simple resta entre imágenes de diferente fecha, previamente tratadas, donde se discrimina aquellas zonas que han experimentado cambios.
- Cociente multitemporal: Establece la proporción, donde se asigna un valor de alteración que existe en la diferencia de imágenes.
- Regresión multitemporal: Comúnmente la regresión se emplea con variables que estén fuertemente asociadas a una variable de interés, pero para la detección de cambios, la regresión se utiliza para estimar cuales serían los cambios de los niveles digitales (ND) en el caso que no hubiera cambios.

2.3. ÍNDICE DE VEGETACIÓN

El cociente entre dos o más bandas puede ser útil para mejorar la discriminación entre dos coberturas terrestres con comportamiento de reflectividad muy distintos, por ejemplo para realzar suelo de vegetación la reflectividad se diferencia entre el visible e infrarrojo cercano. Además, este cociente reduce el efecto del relieve (sombras ocasionadas por la pendiente y orientación) en la caracterización espectral de las distintas cubiertas.

En la Figura 8 se puede apreciar el comportamiento radiométrico de la vegetación en donde se visualiza un claro contraste entre las bandas del visible (banda roja 0,6–0,7 μ m), e infrarroja cercana IRC (0,7-1,1 μ m) dentro del espectro electromagnético.

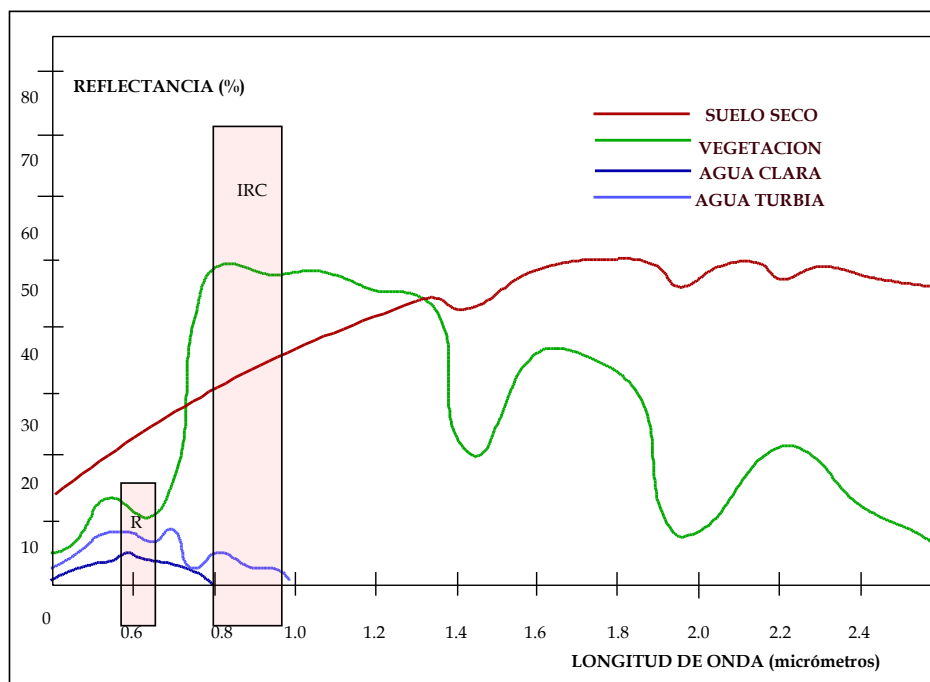


Figura 8. Respuestas espectrales típicas (CLIRSEN)

En el campo visible (RGB) los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de energía que reciben, estas sustancias apenas afectan al infrarrojo cercano, por esta razón, existe un alto contraste entre la reflectividad baja de la banda R del espectro y la alta del IRC lo que permite separar con claridad la vegetación con otras cubiertas.

“En definitiva podemos señalar que mientras mayor sea la diferencia entre la reflectividad de las bandas R y IRC, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada. Bajos contrastes indican una vegetación enferma, senescente o con poca densidad, hasta llegar a los suelos descubiertos o el agua, que presentan una reflectividad muy similar entre el IRC y el R, o incluso inferior en esta última (caso del agua o de algunas nubes)” (Chuvienco, 2002).

Tomando en cuenta este principio, el índice de vegetación está dado por:

$$C_i = \frac{IRC}{R}$$

Ecuación 1 Cociente simple entre las bandas.

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

Ecuación 2 Índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)

Donde,

Ci: Cociente entre bandas.

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada.

IRC: Valor de reflectividad de la banda del infrarrojo cercano.

R: Valor de reflectividad del la banda roja.

Un aspecto muy importante del NDVI, frente al cociente simple, es que varía entre márgenes conocidos (-1 a 1), lo que facilita su interpretación, y por lo tanto es el más utilizado en el análisis digital de imágenes (Chuvieco 2002).

2.4. FRAGMENTACIÓN

La fragmentación se define como la división de un hábitat continuo en pedazos más pequeños y aislados con efectos tales como la reducción del área total, la reducción del tamaño de los parches de hábitat y el aumento del aislamiento en las poblaciones que los habitan (ECOTONO, 1996). Por lo que se deduce que la pérdida continua de un área forestal, tiene también como consecuencia la parcelación de las superficies residuales, es decir, la fragmentación.

El proceso de fragmentación, según Primack 1998, se da en las áreas más accesibles de topografía poco accidentada y con alta productividad, estas son las primeras en ser alteradas para utilizar las tierras en agricultura, extracción forestal o asentamientos humanos.

El proceso de la fragmentación, comúnmente se inicia con la formación de un claro de bosque (GAP) dentro de la matriz a medida que los factores antrópicos avanzan, como se muestra en la Figura 9 (A). Posteriormente, por cierto tiempo

no se ven muy afectadas los hábitats más comunes dentro de la matriz, estos están compuestos por vegetación natural y abundancia en especies (B).

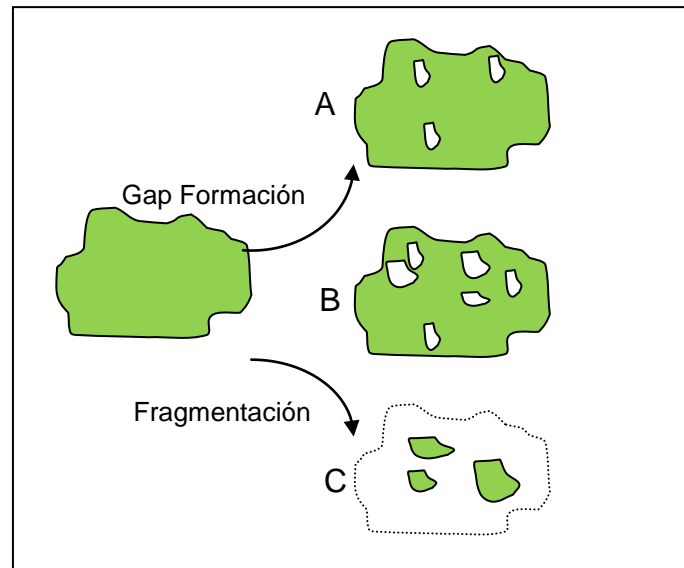


Figura 9. Procesos de Fragmentación

A medida que los GAPS aumentan de tamaño y son más numerosos, terminan abarcando toda la zona de la matriz y con ellos la conectividad de la vegetación se rompe generando un paisaje fragmentado sin poder ser habitadas por algunas especies (C).

Las consecuencias de la fragmentación se enfocan básicamente en la extinción local o regional de especies, pérdida de recursos genéticos, aumento de plagas, polinización, alteración en los procesos edafológicos, alteración de ciclos bioquímicos (Bustamante & Grez, 1995).

Estudios han demostrado que los impactos de la parcelación de los hábitats sobre la biodiversidad dependen de los patrones de fragmentación, por ejemplo se muestra que la abundancia de ciertas especies está relacionada con el

tamaño y el grado de aislamiento de los parches de vegetación (Estrada et al. 1994).

Otras investigaciones mostraron que la fragmentación a través de la multiplicación de los límites entre diferentes ecosistemas, perturba los organismos afines a las condiciones interiores, y en cambio, puede favorecer a otras especies (Lynch et al. 1992).

Las características de ecosistemas fragmentados se reflejan en alteraciones micro climáticas dentro y alrededor del remanente acompañado, alterando el régimen hidrológico, el ciclo de los elementos naturales, propiedades del suelo con el aislamiento de cada área con respecto a otras por lo que se puede decir que existe variación tanto en el ambiente físico como en el biogeográfico.

2.4.1 Índices de Fragmentación

Los índices de fragmentación son una caracterización matemática de los patrones fragmentados, permitiendo evaluar aspectos como tamaño, forma, diversidad, distribución espacial, grados de aislamiento y conectividad de los parches (FAO, 1995); mostrando donde existen alteraciones para dicho hábitad.

La fragmentación de los bosques, es un tipo de degradación que determina cambios en la relación perímetro/superficie.

Para este análisis existen varias metodologías aplicativas definiendo sus parámetros de acuerdo al objetivo planteado. En un estudio de fragmentación realizado por la Universidad Mayor de San Simón en Bolivia (Troche et al. 2002) señalan que existen varios trabajos relacionados con índices estructurales simples tomando como ejemplo los siguientes:

Proporción de bosque en %(PBP)	Mayor parche de bosque en %(MAB)
$PBP\% = \frac{\sum_{j=1}^n s_j}{S} (100)$	$MAB = \frac{Max(f_j)}{S} (100)$

Ecuación 3. Índices Estructurales simples para la cuantificación del cambio de cobertura

Donde,

S: Superficie total

$\sum s_j$ = Sumatoria áreas de bosques.

Max (f_j): Área máxima (parche) bosque.

En dicho estudio también se indica que en Europa, para tratar de uniformizar todas las metodologías ambientales, el índice de fragmentación de la Ecuación 4. Fórmula utilizada para la obtención de índices de fragmentación, abarca todos los aspectos anteriores, como se los puede ver en trabajos de Steenmans y Pinborg (2000) realizado en gran parte de Europa y por Elorrieta et al (2001) realizado en España.

$$IF = f / ((\text{mean count}/16) * (\text{sum count} / 16))$$

Ecuación 4. Fórmula utilizada para la obtención de índices de fragmentación

Donde,

f: Frecuencia

mean count: Número total de celdas sensibles/número de complejos

sum count : Número total de celdas sensibles

16: Número de píxeles a 250 m

El índice de fragmentación que se utilizó para este estudio proviene de un trabajo de Steenmans y Pinborg (2000) de la Agencia Europea de Medio Ambiente ya que esta metodología facilita el cálculo del índice, posee adaptabilidad a la escala de trabajo y los resultados son prácticos al interpretar.

CAPÍTULO III

ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.1 CONSIDERACIONES PREVIAS PARA EL DESARROLLO DEL ESTUDIO.

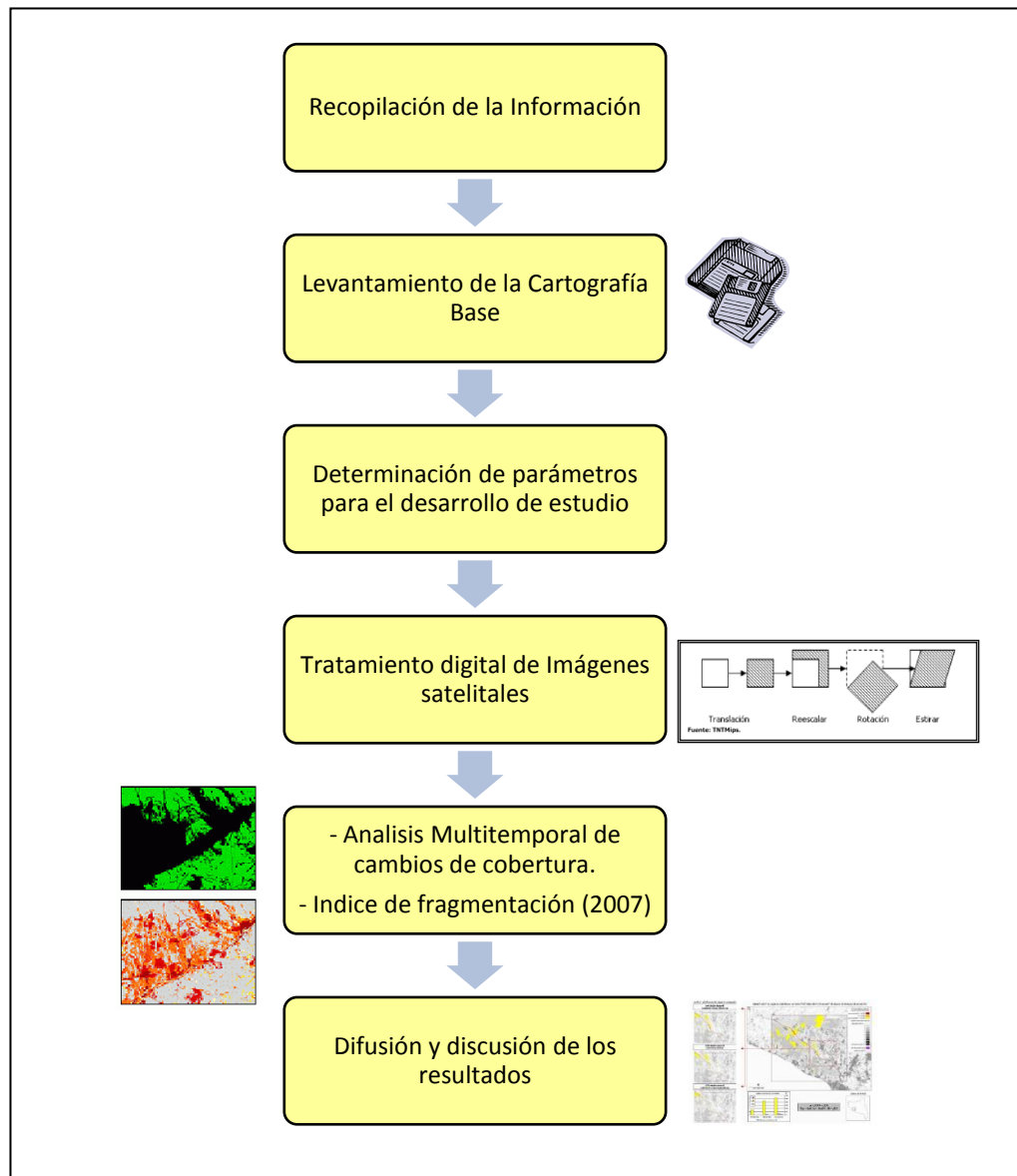


Diagrama 1. Metodología General

Como primer paso, se seleccionó la información bibliográfica adecuada para las metodologías del proceso de análisis de cambios de cobertura, índices de fragmentación, tratamiento digital de imágenes, sensores satelitales, etc.

La información cartográfica base corresponde a las cartas topográficas 1: 50 000 (La Carolina, Maldonado, Hacienda Chiguarán, Tufiño, La Plata, parte de Mira y San Gabriel) y 1: 25 000 (Cerro Golondrinas, Maldonado, La Plata, Hualchán, La Carolina, Río Chutín, Laguna de Potrerillos y Volcán Chiles) elaboradas por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador que fueron sometidas a un proceso de edición y estructuración para el ingreso al SIG. Dichas cartas se utilizaron para georeferenciar las imágenes satelitales.

Las imágenes provienen de los satélites LANDSAT TM, ETM+ y ASTER procedentes del Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN). Estas fueron sometidas a las correcciones correspondientes para el análisis del cambio de cobertura y fragmentación.

A continuación se detalla las imágenes satelitales:

Tabla 2. Imágenes satelitales adquiridas

IMAGEN	FECHA	BANDAS
LANDSAT 5 TM	13/09/1991	1,2,3,4,5,6,7
LANDSAT 5 TM	15/10/1991	1,2,3,4,5,6,7
LANDSAT 5 TM	24/07/1996	3,4,5
LANDSAT 7 ETM+	12/04/2002	1,2,3,4,5,6,7,8
ASTER L1b	05/02/2007	VNIR, SWIR, TIR (Comprende 14 canales)

Para mayor detalle de las características de las imágenes satelitales ver en ANEXOS (Anexo 1).

Debido a que la imagen del 2005 no era favorable para los análisis, se adquirieron imágenes adicionales, ampliando así el rango de estudio entre el año 1991 al 2007.

Uno de los factores importantes para el desarrollo de un proyecto es definir la escala de trabajo, los aspectos considerados son: unidad mínima de mapeo, resolución espacial de cada imagen satelital y área de estudio. A partir de estas características se definió que la escala de trabajo para este estudio es 1: 50.000 ya que es la más conveniente para su interpretación y desarrollo.

Tabla 3. Unidad Mínima de Mapeo

Nivel de Detalle	Escala de Trabajo	UMM	Alcance
Nacional Cuencas Transfronterizas (Muy Pequeño)	1:1' 000 000 1: 3'000 000	15 Km ² 150km ²	Formulación de políticas nacional. Planificación a escala nacional. Cuencas o ecosistemas transfronterizos. Identificación general de proyectos.
Regional Cuencas (pequeño)	1: 100 000 1: 500 000	625 ha 625 ha	Formulación e implementación de políticas regionales. Planificación a escala regional: departamentos, regiones, cuencas.
Subregional Subcuencas	1: 50 000 1: 100 000	6,25 ha 25 ha	Planificación a escala subregional – local: provincias, Subcuencas, municipios, distritos. Factibilidad técnica de proyectos.
Local Microcuencas (Grande)	1: 25 000 1: 50 000	1,56 ha 6,25 ha	Implementación de programas y proyectos a nivel local: Municipios, veredas, fincas, microcuencas. Estudios de factibilidad técnica y económica de proyectos.
Microlocal (Muy Grande)	1 ; 25 000 1: 5 000	1,56 ha 0,06 ha	Monitoreo y seguimiento específico.

UMM: Unidad Mínima de Mapeo

Fuente: Serie Manuales de Educación y Capacitación Ambiental, Ángela Andrade Pérez, Fabián Navarrete Le Blas.

Para el desarrollo del estudio se emplearon los siguientes programas:

- ERDAS 8.4
- ARCGIS 9.2
- ILWIS 3.2

El tratamiento digital de las imágenes se lo realizó exclusivamente con el software ERDAS 8.4 y sus extensiones requeridas. Para los demás procesos se alterno el uso de todos los programas mencionados dependiendo de su destreza.

3.2 TRATAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES

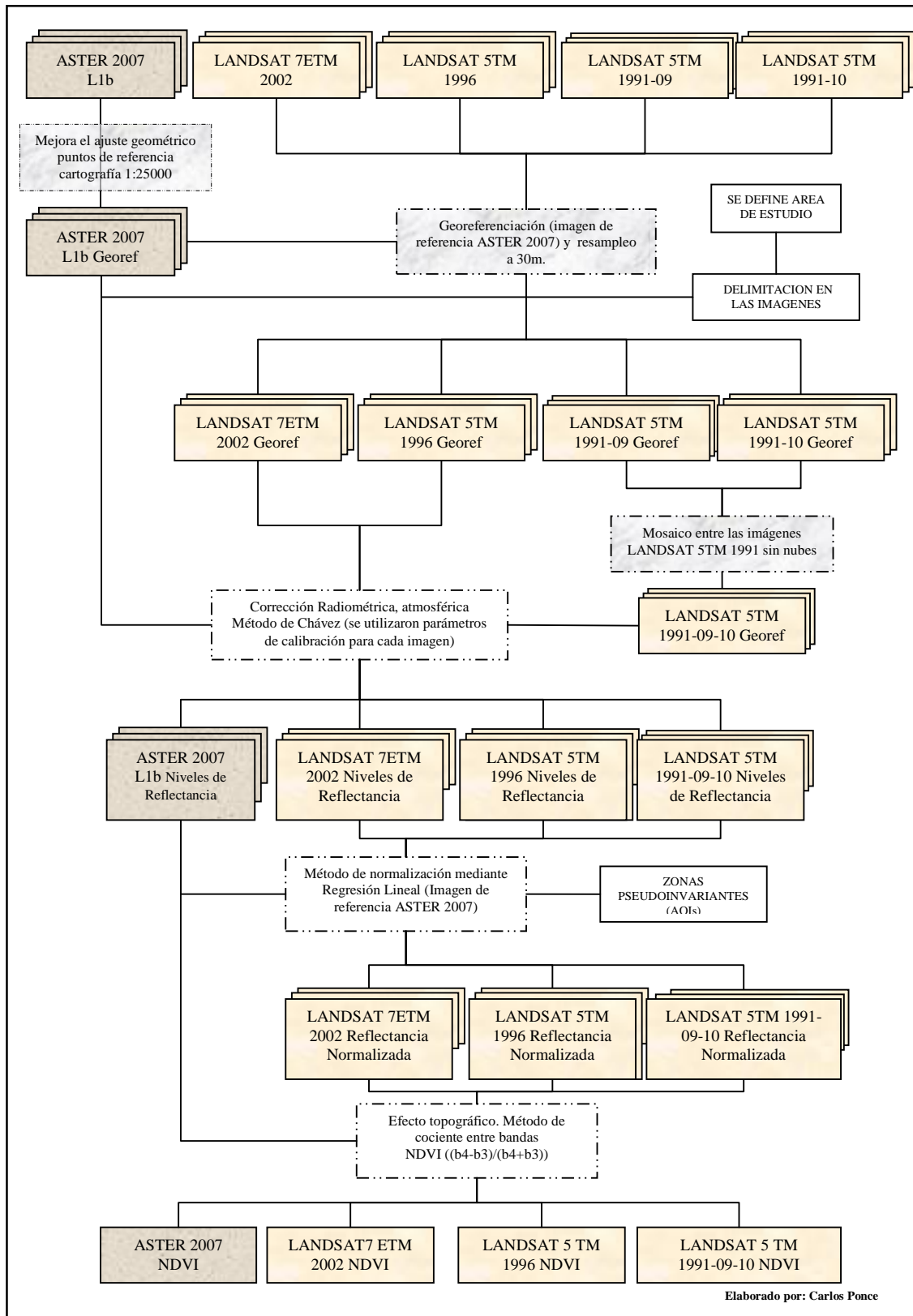


Diagrama 2. Tratamiento Digital de las Imágenes

3.2.1. Corrección geométrica

Para iniciar el proceso de georeferenciación de las imágenes se utilizó como referencia a la imagen ASTER 2007 que ya posee un nivel de procesamiento L1B; por lo tanto, se mejoró la precisión posicional mediante puntos de control adquiridos por la cartografía digital de la zona a 1: 25 000.

Este proceso se realizó utilizando el modulo "Image Geometric Correction" (Figura 10) que consiste en:

- Ubicación de puntos comunes entre la imagen y la cartografía digital.
- Cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y la de referencia (cartografía digital).
- Transferencia de los ND originales a la nueva posición.

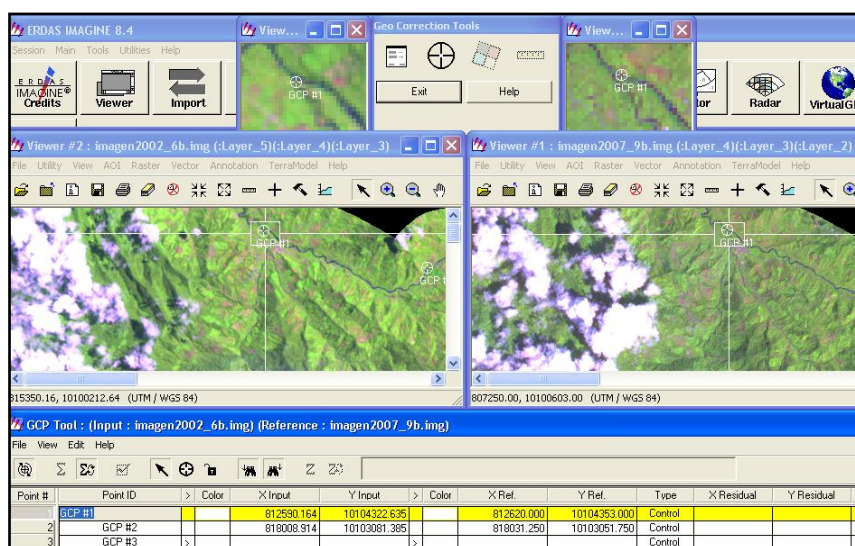


Figura 10. Georeferenciación de las imágenes satelitales

Para calcular estas funciones, se requiere contar con una serie de observaciones comunes entre la imagen y la de referencia. La calidad del ajuste dependerá del rigor con que se localicen esos puntos y de cómo se definan los errores geométricos de la imagen.

Debido a que el terreno es rugoso y el sensor varía notablemente las condiciones de observación, fue necesario utilizar una ecuación de tercer orden requiriendo como mínimo 10 puntos de control. Es recomendable superar con creces ese listón mínimo para garantizar una buena conformidad entre la

imagen y el mapa. Bernstein (1978) aconsejaba seleccionar entre 14 y 20 puntos de control para una imagen multiespectral.

Se ubicaron 53 puntos de control localizados en características naturales y antrópicas no sujetos a dinamismo temporal (cruces de carreteras, caminos, vías, intersecciones de quebradas, lagunas, etc.) distribuidos en toda la imagen.

Para evaluar el error de la georeferenciación se analiza la diferencia entre las coordenadas estimadas por la regresión y las reales para cada uno de los puntos muestrales empleados en el proceso. El promedio de dichos residuales se conoce como el error medio cuadrático (RMSE siglas en inglés) cuyo valor debe ser igual o inferior a 1 pixel.

En el proceso de georeferenciación de este estudio se obtuvieron valores de 0.5 a 0.8 RMSE.

3.2.2. Área de Estudio

Para delimitar el área de estudio se tomaron en cuenta diferentes características socio ambientales como la población, el análisis estructural del paisaje, la conectividad del corredor a nivel de pisos altitudinales, especies indicadoras, entre otros. Además, se tomó en cuenta los límites provinciales; todo esto con el fin de unificar el concepto de corredor de conservación comunitaria.

Como consecuencia de lo anterior se propuso una zona donde abarca los elementos propicios para aplicar las diferentes metodologías de estudios, en este caso para el análisis de cambio de cobertura y el índice de fragmentación. (Ver Figura 1. Mapa de Ubicación de la zona de estudio).

Utilizando el modulo “*Mask*” se procedió a cortar cada una de las imágenes, limitando así el área de estudio.

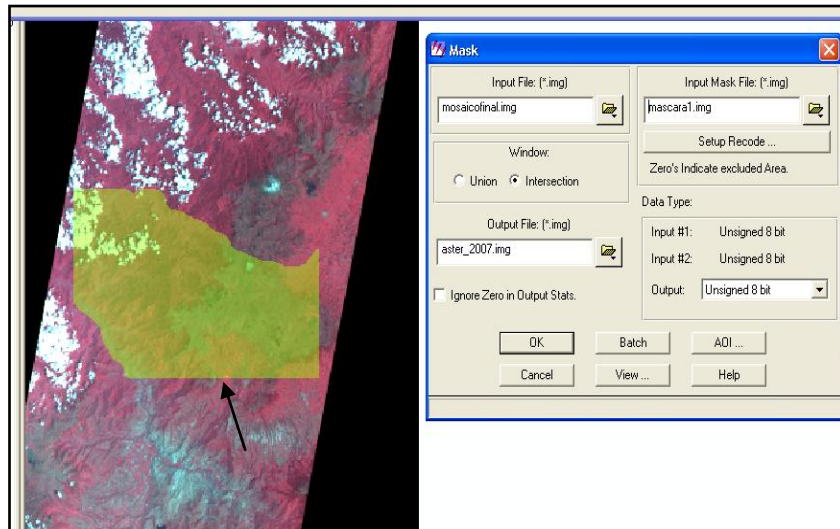


Figura 11. Límite del área de estudio en la Imagen Satelital ASTER 2007

3.2.3. Corrección Radiométrica

La corrección radiométrica modifica los ND originales para obtenerlos en valores de magnitudes biofísicas, de este modo acercarnos al valor real presente en la superficie terrestre.

Para las imágenes del estudio se realizó el siguiente procedimiento:

3.2.3.1 Restauración de líneas o píxeles perdidos

En las imágenes Landsat 5 TM 1991 y 1996, la visualización de la banda 3, presentó una serie de anomalías como píxeles aislados de aspecto muy contrastado con los vecinos, efecto conocido como “sal y pimienta”.

Para los procesos de corrección, de la forma convencional, se estima los ND de estos píxeles erróneos con los ND de los píxeles vecinos. De acuerdo al fenómeno de la auto-correlación espacial, muchas variables geográficas tienden a presentar una fuerte asociación en el espacio (Campbell, 1981; Cliff y Ord 1973). Por lo tanto se utilizó el módulo de “*Noise Reduction*” del ERDAS 8.4 aplicando filtros para la corrección de ND erróneos.

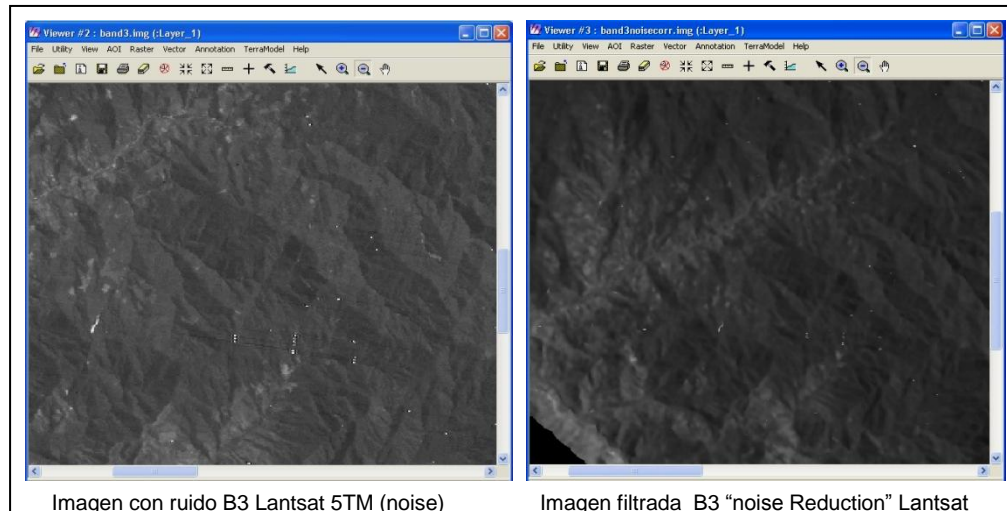


Figura 12. Corrección del ruido

3.2.3.2 Corrección del Bandedo de la imagen

Este efecto se debe a una mala calibración entre los detectores que conforman el sensor en especial por equipos de barrido. Este bandedo se lo conoce también como *striping*.

Para ajustar digitalmente la señal detectada por cada uno de los sensores se asume que todos ellos, en el caso de estar bien calibrados, tendrían a presentar similares histogramas (Emilio Chuvieco 2002). Por lo tanto se aplican procedimientos estadísticos para ajustar los histogramas que presenta la imagen y así mejorar el efecto del bandedo.

En la imagen Landsat 5TM 1991 la banda 3 presenta este efecto, para corregirla se utilizó "*Destripe TM Data*".

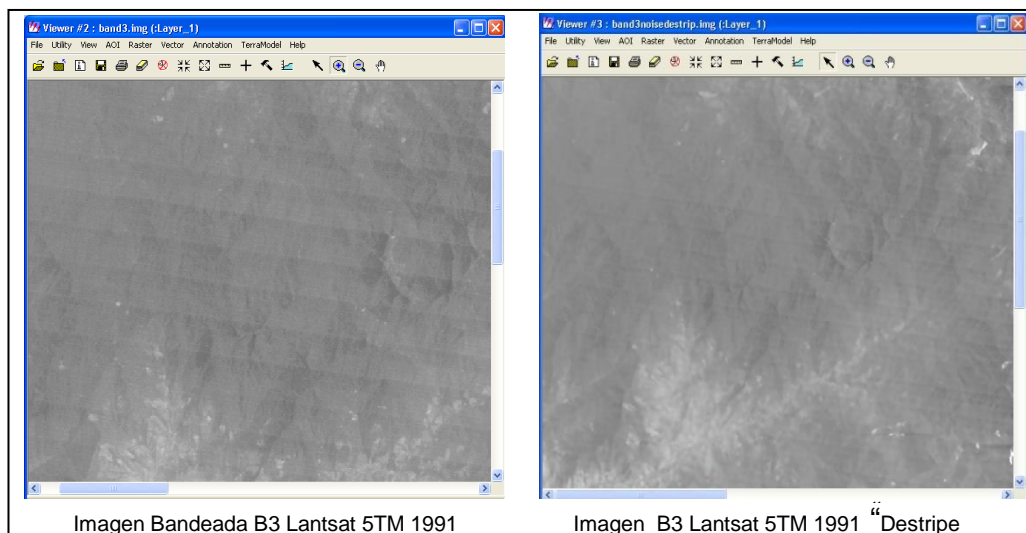


Figura 13. Corrección del bandeo

3.2.3.3 Cálculo de reflectividad

Es esencial trabajar con magnitudes biofísicas especialmente si existen imágenes de distintos años y de diferentes sensores si se pretende realizar detección de cambios. Los ND de las imágenes se encuentran con valores relativos, por lo cual se complicaría comparar bandas entre si “Un mayor ND entre dos bandas, no indica necesariamente mayor reflectividad”, Emilio Chuvieco, 2002.

Si se trabaja con reflectividad, variable biofísica, se establecerían parámetros homogenizados entre las imágenes, por lo cual nos permite realizar un análisis multitemporal garantizando que no existe errores de omisión y comisión.

Existen varios modelos para la transformación a valores de reflectividad que se basan en los datos de calibración de las imágenes satelitales. En este caso con las imágenes adquiridas en el CLIRSEN cada una de ellas contiene metadatos, es decir los parámetros que vienen definidos por el sensor, que son muy útiles para la transformación a reflectividad absoluta tomando en cuenta el factor atmosférico.

En los anexos 1, 2 y 3 muestran los rangos espectrales para cada banda, características de toma de las imágenes adquiridas y los parámetros de calibración para su posterior procesamiento que se detalla más adelante.

3.2.3.4 Correcciones Atmosféricas

La radiación electromagnética se encuentra en constante interacción con la atmósfera en especial dominada por el CO₂, el vapor de agua y el ozono O₃. El anhídrido carbónico realiza una fuerte absorción de radiación con longitudes de onda que varían entre 4,3 y 15 micras en los primeros 100 Km.

El vapor de agua en su concentración es muy variable y es el mayor absorbente de todos los componentes atmosféricos en las bandas comprendidas entre las 0.7 y 8 micras, inclusive en torno a las 6 micras puede llegar a un 100% de absorción debido a la humedad atmosférica, esta se encuentra en los primeros 15Km.

El ozono se concentra entre 20 y 50 Km, absorbe la radiación ultravioleta.

También es muy importante señalar el polvo atmosférico (0,1 y 10 μ m) ubicados en los primeros kilómetros que dispersa la radiación visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio. Finalmente, las nubes que constituyen agua sólida y líquida, dispersa la radiación óptica y en algunos casos el Infrarrojo cercano y medio.

Por lo antes mencionado se concluye que la influencia atmosférica afecta en el cálculo de reflectividad en el flujo descendente y ascendente considerando también la dispersión por los objetos que interfieren con la señal del satélite; en consecuencia, la radiancia que recibe el satélite no es la misma que se encuentra en la superficie terrestre que es la que nos interesa medir.

Para las correcciones atmosféricas se basa en los siguientes procedimientos propuestos por King et al,1999; Rodin, 1998; Sobrino, 2000:

- A partir de las medidas in situ, mediante radio sondeos, mediciones de radiancia solar incidente o de la reflectividad del terreno. Es preciso pero no muy disponible por los materiales a utilizarse.
- A partir de las imágenes de otros sensores, por ejemplo la plataforma Terra provee de un sensor MISR que mide el espesor atmosférico o el MODIS que mide la reflectividad o temperatura. En este caso no existen muchas experiencias.
- A partir de modelos físicos de transferencia radiactiva, donde la exactitud dependerá de las asunciones que se realicen y otros factores de toma.
- A partir de datos de la propia imagen, este método es muy operativo ya que existen los parámetros de calibración y además las características de toma para cada una de las imágenes incorporadas en los metadatos.

Existen varios programas que son muy operativos donde se basan en los últimos dos procedimientos que son accesibles siempre y cuando las condiciones atmosféricas de las imágenes sean similares con los modelos existentes.

Tomando en cuenta el cuarto procedimiento, es decir encontrar una metodología que utilice las condiciones atmosféricas disponibles en el sensor. Se ha propuesto un método desarrollado por el concepto del objeto oscuro (*dark object*) que fue realizado por Chávez en 1975 y ha ido mejorando en el transcurso de los años. Consiste en asumir valores de radiancia espectral próximos a cero a las áreas que presentan fuerte absortividad como el agua, áreas con sombras.

Para obtener dicha aproximación se debe restar los ND con el ND mínimo de cada banda de la imagen, pero los errores pueden ser considerables para valores de reflectividad altos al no tomar en cuenta las transmisividades del flujo incidente y reflejado.

Para evitar este problema, Chavez sugiere estimar la transmisividad descendente a partir del espesor atmosférico definido por el ángulo cenital (θ_i) y además no considera la irradiancia difusa para observaciones verticales.

Finalmente utiliza valores de transmisividad estándar (T_{ki}), cuya fórmula de reflectividad es:

$$\rho_k = \frac{D\pi(L_{sen,k} - L_{a,k})}{E_{o,k} \cos\theta_i T_{k,i}}$$

Ecuación 5. Cálculo de reflectividad (Chavez, 1996)

Donde,

$$L_{a,k} = a_{0k} + a_{1,k} ND_{\min} \text{ (Valores de radiancia espectral determinada por el nivel digital mínimo)}$$

$$L_{sen,k} = a_{0,k} + a_{1,k} ND_k \text{ (Valores de radiancia espectral detectada por el sensor).}$$

$$D = (1 + 0.01674(\sin(2\pi(j - 93.5)/365)))^2$$

$$j = \text{dia.juliano}$$

Los datos se encuentran en los parámetros de calibración (ver Anexo 3) y en las características de cada una de las imágenes (ver Anexo 2).

Para la aplicación de esta metodología se programó la ecuación de reflectividad de Chávez en el módulo "Model Maker" del ERDAS 8.4. A continuación se presenta el modelo:

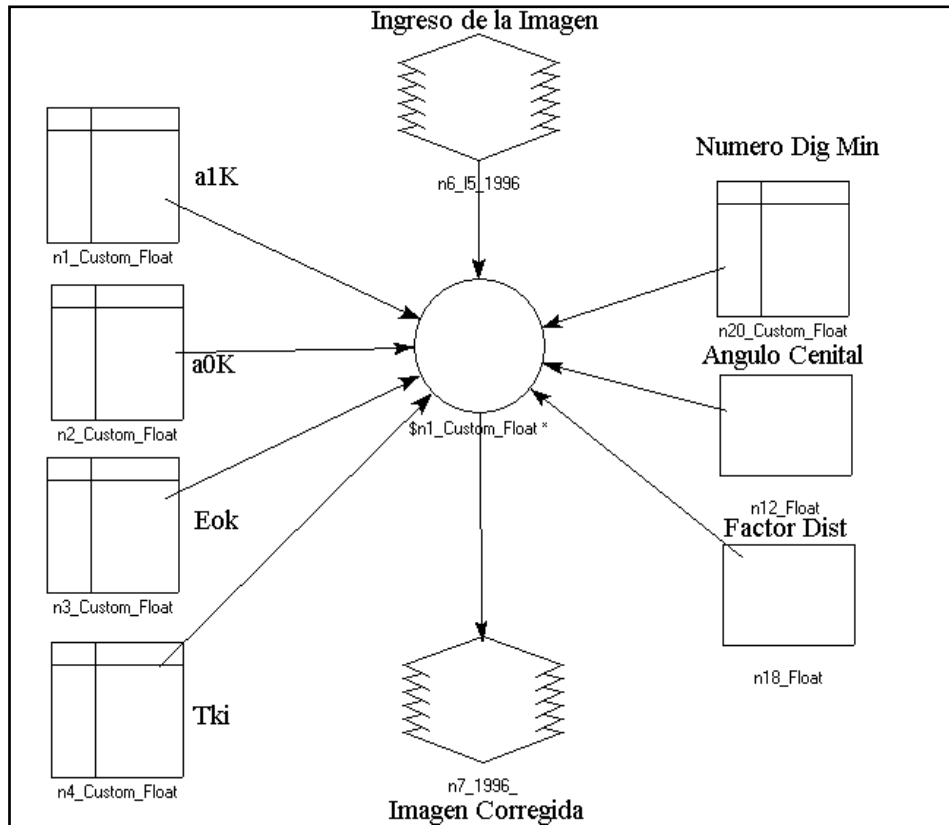


Figura 14. Modelo desarrollado para la corrección atmosférica (Método de Chávez).

3.2.4. Normalización relativa de las imágenes por el método de ajuste lineal

Se realizó un mosaico con las imágenes corregidas por el método de Chávez y se identificó claramente que su metodología no era muy adecuada con las imágenes adquiridas (ver Anexo 4), por lo tanto, para mejorar la normalización de las imágenes se realizó el método de ajuste lineal en función de la media.

Los valores de las imágenes corregidas son ajustadas a la imagen que se toma como referencia, en este caso se definió la ASTER L1b 2007 por su nivel de corrección, a continuación se procedió de la siguiente manera:

- Primero se seleccionaron muestras donde existan zonas pseudos invariantes, es decir donde correspondan aquellas que por conceptos subjetivos o por similitud radiométrica pueden ser consideradas como

zonas que no han variado en el transcurso de los años. Se generó un archivo de AOIs en el ERDAS 8.4.

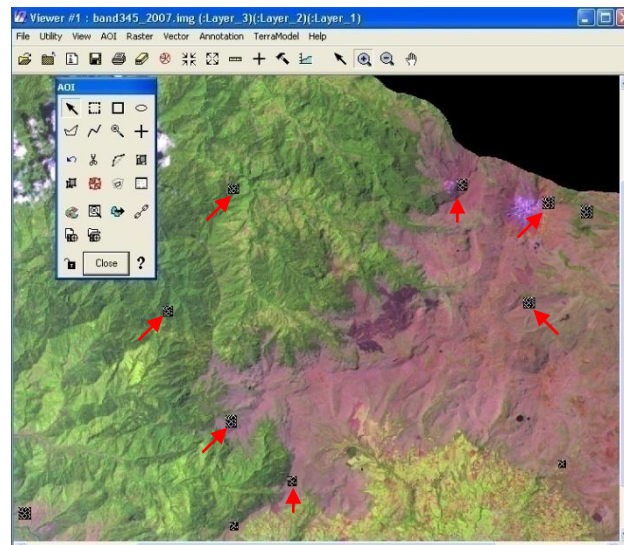


Figura 15. AOIs de zonas pseudos invariantes

- Se separó las imágenes de los distintos años por banda, es decir, se generó un solo archivo donde constaba la misma banda en los años de 1991, 1996, 2002 y 2007. Se utilizó el modulo de “Layer Stack” del mismo Software.
- Se procedió a sacar los datos estadísticos para cada uno de las zonas de interés (AOIs) en referencia a las imágenes generadas por banda (ver Anexo 5).
- Por medio de mínimos cuadrados se obtuvieron los datos para realizar el ajuste lineal (ver Anexo 6).

Ecuación Lineal $y = ax + b$

$$AXa - Lb = V$$

Ecuación 6. Modelo matricial de mínimos cuadrados

Donde,

A = Jacobiano (derivada de la función lineal).

$Xa = a, b$ (coeficientes de reflectividad).

Lb = Observaciones (“y” de la ecuación lineal).

V = Residuales

Ejemplo; Cálculo de los coeficientes de reflectividad para la imagen de 1991 con respecto a la 2007.

$$\begin{array}{c} \text{Muestra 1} \\ \text{Muestra 2} \\ \text{Muestra 3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \begin{pmatrix} 0,022 & 1 \\ 0,033 & 1 \\ 0,022 & 1 \\ 0,038 & 1 \\ 0,02 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0,029 \\ 0,019 \\ 0,011 \\ 0,059 \\ 0,026 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \end{pmatrix}$$

A Xa Lb V

A = Valores de reflectividad de la imagen 1991

Lb = Valores de reflectividad de la imagen de referencia 2007

Por lo tanto:

$$N = A^T P A \rightarrow U = A^T P L b \rightarrow X a = N^{-1} U \rightarrow X a = \begin{bmatrix} 1.922 \\ -0.018 \end{bmatrix} \rightarrow \\
 \langle mag 2007 \rangle = \langle mag 1991 \rangle \cdot 1.922 - 0.018$$

Donde P es la matriz de pesos, en este caso es la identidad.

- Para realizar el ajuste lineal se utilizó el módulo “Model Maker”
- Mediante el Modulo de “Layer Stack” se adjunto las bandas correspondientes a cada imagen.
- Finalmente se comprobó mediante gráficas normalizadas (ver Anexo 7) y mosaicos comparando antes y después del proceso (ver Anexo 4).

3.2.5. Correcciones Topográficas

Para el cálculo de reflectividad es muy importante tomar en cuenta los efectos de relieve. Los efectos generados por la gradiente y dirección de la pendiente son muy evidentes. Para la corrección topográfica, se puede eliminar por medio de módulos que existen en varios programas utilizando el modelo digital de

elevación (MDE) de la zona, para su aceptación requiere de una interpretación visual ya que en algunas partes se puede sobre corregir la imagen.

Una manera sencilla para eliminar el efecto por relieve sería realizando un simple cociente entre bandas de las mismas imágenes, puesto que el ángulo de incidencia solar es constante entre bandas. Esto supone que el efecto de la topografía es invariable en cada banda (Chuvienco, 2002).

Tomando en cuenta la Ecuación 2 Índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalizad Difference Vegetation Index), se realiza un cociente entre bandas eliminado así el efecto por relieve en las imágenes satelitales. Este índice es utilizado para la detección de cambios de cobertura que se detalla a continuación

3.3 TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA

3.3.1. Composiciones de color multitemporal

Esta técnica permite combinar tres fechas de la misma banda o índice en los distintos cañones de color disponible para rojo, verde y azul. (R, G, B siglas en ingles). Por lo tanto si existe ND con valores similares entre las distintas fechas se presentarían en tonalidades grises mientras que aparecerían en tonos de color los valores diferentes entre las imágenes (Figura 16).

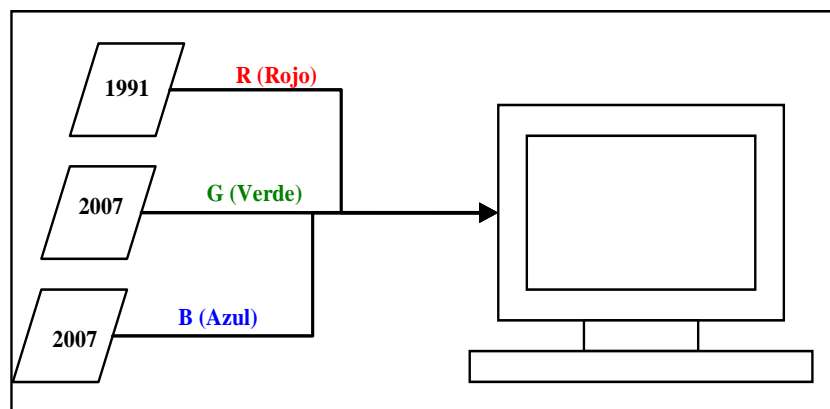


Figura 16. Esquema de una composición de color multitemporal

El inconveniente de esta metodología es determinar qué tipo de cambio se está efectuando por la razón que es solo una interpretación visual, por lo tanto, es muy importante tener en cuenta la visita de campo o aplicar otra técnica para tener conocimiento del fenómeno.

Como resultado del tratamiento digital de imágenes se obtuvo el NDVI de cada una de las fechas, posteriormente se procedió combinar de la siguiente manera: Rojo a la primera fecha y verde más azul la segunda fecha.

Por técnica de composición de colores los tonos rojos revelaron decremento de NDVI (por ejemplo pérdida de cobertura vegetal debidas a talas, cosechas, incendios, etc.) mientras que el color cian indicaron aumentos de NDVI (ganancia de vegetación, por ejemplo a causa de la puesta en cultivo donde existió suelo descubierto o por desecación de una lámina de agua) (Chuvieco 2002).

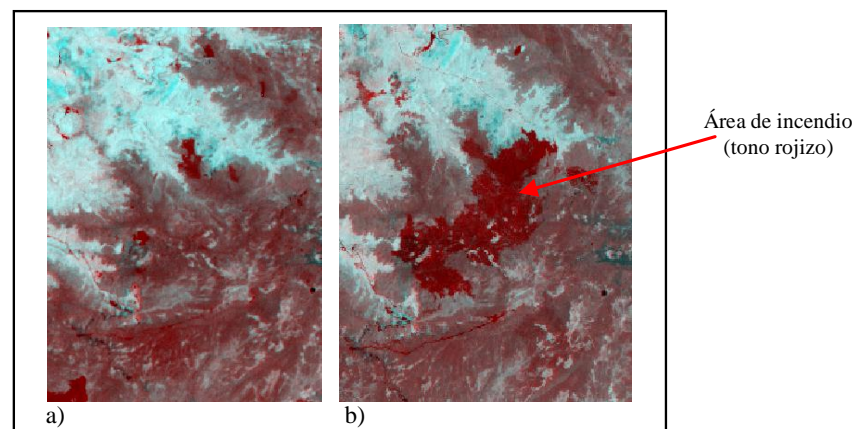


Figura 17. Comparación de color multitemporal

En la Figura 17, se hace una comparación de color multitemporal entre los NDVIS de las imágenes de 1991-2002(a) y 1991-2007 (b), donde se puede visualizar el área del incendio (en tono rojizo) ocasionado en el 2007 (zona oeste de la Reserva Ecológica del Ángel).

No existe una norma determinada para combinar entre bandas o índices en la composición de los cañones (RGB), que proporcione una buena información en la determinación del cambio. Por lo tanto, siguiendo el procedimiento planteado

por Chuvieco 2002, se diseña la comparación entre NDVIs tomando en cuenta los cambios que no se deben interpretar por consecuencia de nubosidad o sombras, para evitar estos errores de interpretación se enmascaró estas zonas para descartar posibles cambios erróneos (Figura 18).

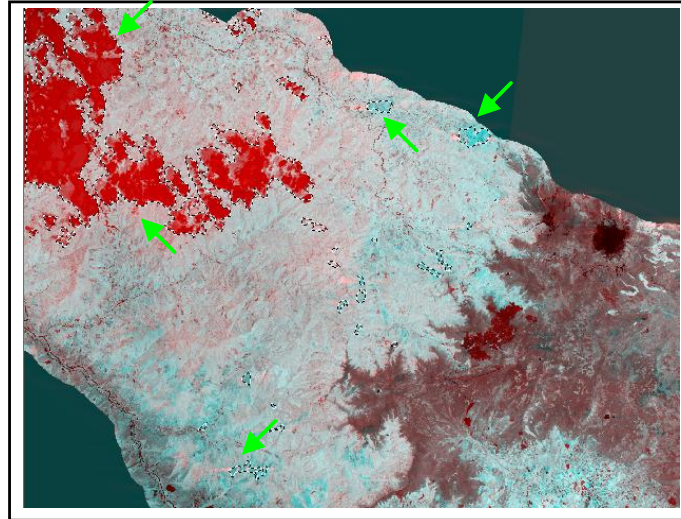


Figura 18. Comparación de color multitemporal con nubes y sombras enmascaradas

En esta figura se realizó la comparación de color multitemporal entre los NDVIs de las imágenes de 1991 y 2007.

Además de utilizar los NDVI, se utilizó combinaciones de color de la banda 4 ya que tienen buena correlación espacial entre las imágenes de las diferentes fechas.

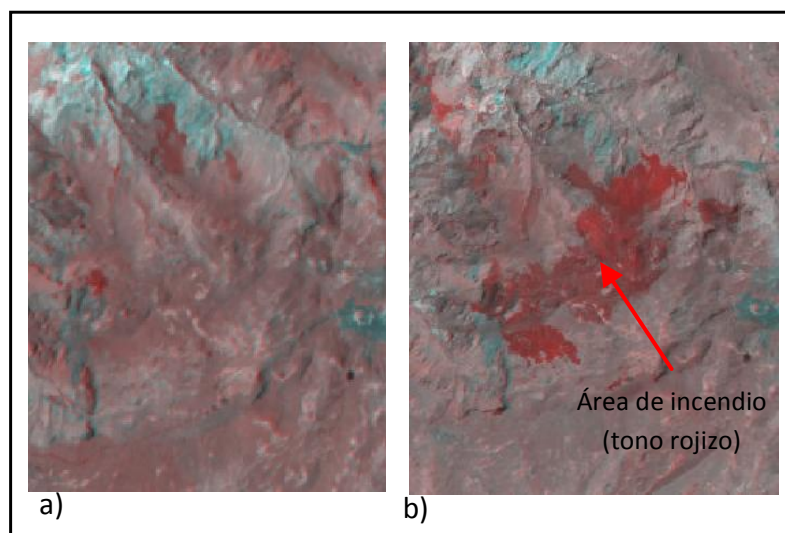


Figura 19. Composición de color multitemporal entre la banda 4

En la Figura 19 se compara entre la banda 4 de las imágenes 1991-2002(a) y 1991-2007 (b). Donde se puede visualizar el cambio en tono rojizo asemejándose a la composición de imágenes de los NDVI (Figura 17).

3.3.2. Diferencia entre las imágenes

Al restar las imágenes, los niveles digitales de las fechas que no han variado presentan valores cercanos a cero mientras que los valores que hayan cambiado en el transcurso del tiempo se mostraran distintos a cero pudiendo ser positivos o negativos.

$$ND_c = ND_{t_2} - ND_{t_1} + C$$

Ecuación 7. Diferencia entre imágenes multitemporal

Donde,

ND_c = Imagen como resultado del cambio.

$ND_{t_2}ND_{t_1}$ = Corresponde a las imágenes del segundo y primer período.

C = Constante para evitar valores negativos.

Al presentar valores bajos o negativos, en la visualización de la imagen, se observa con tonos oscuros representando una reducción del nivel digital, mientras que los tonos claros representan un aumento en el ND y las zonas estables con valores digitales intermedios.

Las imágenes que se sometieron a este proceso establecen zonas que han perdido o ganado vigor vegetal por cambios producidos ya sea por talas, incendios, avance de la frontera agrícola etc. Este análisis se realizó con los NDVIs de las imágenes de las mencionadas en la Figura 20.

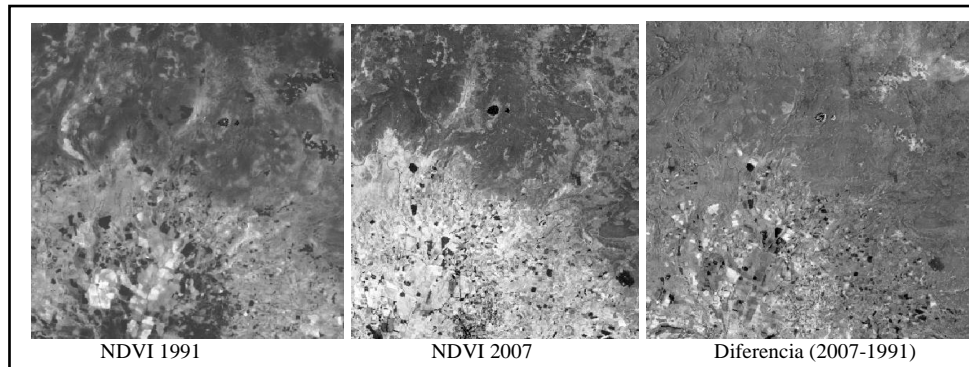


Figura 20. Diferencia entre NDVI de 2007 y 1991

La diferencia entre las imágenes presenta un perfil gausiano en donde las máximas frecuencias corresponden a las zonas estables, mientras que las áreas dinámicas (zonas que han cambiado) se encuentran en los extremos de la curva.

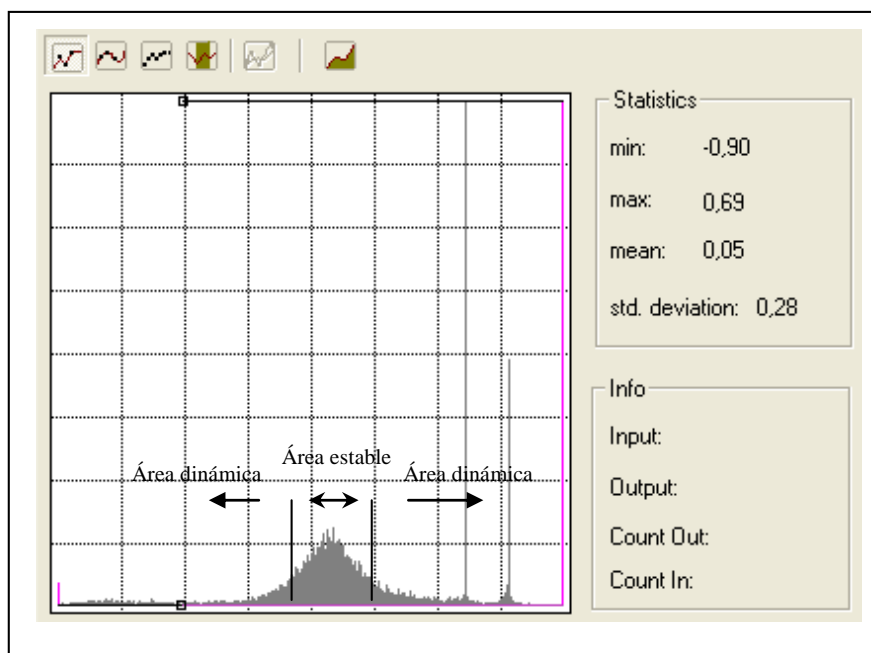


Figura 21. Histograma de la imagen de diferencia entre 2007 - 1991

El valor del umbral para determinar zonas de cambio/no cambio es crítico ya que un valor demasiado bajo inundará el mapa de diferencias con cambios

falsos, mientras que un valor alto suprimirá los cambios significativos. El umbral debe ser dependiente de la diferencia de imagen respectivamente a sus cambios. Para determinar el umbral debe ser calculado dinámicamente basado en el contenido de la imagen.

Existe una variedad de métodos para determinar el umbral pero son muy pocos los disponibles y apropiadas a la detección de cambios (Felipe Granados, Jorge Marín 2007).

Ben Maathuis 2001, plantea la utilización de la desviación estándar de la imagen para el análisis de cambios y no cambios poniendo en consideración lo siguiente:

$$\tilde{X} + \delta \text{ y } \tilde{X} - \delta$$

Ecuación 8. Umbral de cambio de cobertura

Donde,

\tilde{X} = media de los valores digitales de la imagen.

δ = la desviación estándar diferencia de imágenes.

Este intervalo representa la zona donde no existe cambios, mientras que en los extremos sí.

Se ha definido que para más menos una desviación estándar representa el 68% de confiabilidad de la imagen donde existirían cambios. Este valor es representativo evita errores de omisión y comisión.

La fórmula que permite transformar los valores de cualquier variable X_i en puntajes de Z (distribución Gaussiana) es la siguiente:

$$Z = \frac{X_i - \tilde{X}}{\delta}$$

Ecuación 9. Formula de la distribución Gaussiana aplicada a la diferencia multitemporal

Donde,

Z = es el valor que representa en la distribución normal.

\tilde{X} = valor medio de la imagen.

δ = desviación estándar de la imagen.

X_i = Valor de la variable desconocida.

3.3.3. Cociente Multitemporal

El Cociente Multitemporal ofrece una significación del cambio frente a los valores originales, mientras que la diferencia entre imágenes resulta una técnica sencilla para observar cambios entre ellas.

Por ejemplo, una reducción de 20 entre las fechas puede representar una prioridad si el ND original era de 40, mientras que resulta de menos importancia si el ND de la primera fecha era 200 (Chuvieco, 2002).

Por lo tanto:

$$ND_c = ND_{t_2} / ND_{t_1} \times C$$

Ecuación 10. Cociente multitemporal

$$ND_{i,j,c} = \left(\frac{ND_{t_2} - ND_{t_1}}{ND_{t_2} + ND_{t_1}} + 1 \right) \times 127$$

Ecuación 11. Índice de cociente multitemporal normalizado

ND_c = Imagen como resultado del cambio.

$ND_{t_2} ND_{t_1}$ = Corresponde a las imágenes del segundo y primer periodo.

$ND_{i,j,c}$ = Índice de cociente multitemporal normalizado

C = Constante para evitar valores negativos.

El valor de 1 y 127 se utiliza para re-escalar el resultado entre 0 – 254.

Al trabajar con índices de vegetación es muy importante tener en cuenta la fecha de la imagen que va al numerador y al denominador; por ejemplo si se reduce el nivel digital a la mitad, puede representar como 2 o 0.5 y su interpretación se lo hace dependiendo de la posición que se ha colocado cada una de las fechas de las imágenes en la fórmula del cociente multitemporal.

Cuando se dividió los valores de reflectividad entre las imágenes se obtuvo problemas al interpretar estos datos, ya que generaba valores sumamente altos y bajos.

Por lo tanto, basándonos en la teoría de ajuste del contraste propuesta por Chuvieco (2002), para adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad de visualización se presentan dos aspectos importantes:

- Que el rango de ND de la imagen sea menor que el sistema de visualización.
- Que la imagen presente un rango mayor de ND que el sistema de visualización.

En el primer caso se debe ampliar el contraste, en cambio en el otro se debe reducir.

La modificación de los valores digitales se puede realizar aplicando una función de compresión o expansión que permita distribuir los niveles digitales en otra escala, pudiendo ser de tipo lineal o no lineal (Schowengerdt, 1997). Este fundamento es importante para proceder a aplicar el método de cociente multitemporal ya que estabiliza un rango de valores digitales a las imágenes que van a ser divididas.

Analizando varios modelos (ecualización del histograma, expansión lineal con y sin percentiles, expansión especial del contraste) (Chuvieco, 2002); la metodología con la que se obtuvo mejores resultados fue la expansión lineal, dado por la fórmula siguiente aplicada a cada una de los NDVI de cada año:

$$NDi = Integer \left(\frac{ND - ND \text{ min}}{ND \text{ max} - ND \text{ min}} * 255 \right)$$

Ecuación 12. Expansion lineal de los valores digitales

En esta fórmula se aplicó la expresión “*Integer*”, en el “*Model Maker*” del ERDAS 8.4, donde indica que el resultado se redondea al entero más cercano además $NDi = 0$ cuando $NDi < 0$, y $NDi = 255$ cuando $NDi > 255$. También impide que el divisor tenga un valor sumamente bajo (por ejemplo 0,00001, ya que se trabaja con imágenes *float Double*) evitando que cuando se aplique la división entre imágenes se obtengan valores erróneos.

A continuación se procedió a dividir la imagen obtenida del año más reciente para la más antigua (imagen 2007 y 1991), para ello se realizó el modulo del “*Model Maker*” utilizando el siguiente condicional dentro del modelo.

**“*EITHER 1 IF (imag1991ndvi == 0 AND imag2007ndvi == 0) OR EITHER
imag2007ndvi IF (imag1991ndvi == 0) OR imag2007ndvi/imag1991ndvi
OTHERWISE OTHERWISE*”**

En la imagen resultante, se obtuvo valores de 1 si los ND de las fechas divididas son iguales incluyendo el valor de 0, y si existe división para cero se mantiene el valor del dividendo.

Valores mayores a 1 se definen como ganancia y menores como pérdida de valor digital en una proporción dada.

Algunos autores recomiendan realizar una conversión logarítmica del resultado (Eastman et al., 1994) ya que implica una transformación no lineal de las relaciones temporales. La aplicación del logaritmo a la imagen da como resultado valores de 0 a las zonas donde no existen cambios, y valores mayores y menores a cero a las zonas que han ganado y perdido reflectividad respectivamente.

Para comprender mejor el cambio en algunas zonas de importancia, este resultado logarítmico se ajustó dentro de un rango de -100 a 100 con el fin de

tener un porcentaje aproximado de cambio. Se utilizó el mismo procedimiento y concepto para la obtención de la fórmula de expansión lineal:

$$NP = s + gND$$

Donde,

$NP = \text{Nivel Porcentual}$

$s = \text{sesgo}$

$g = \text{ganancia}$

$ND = \text{nivel digital de la imagen}$

Se iguala máximos y mínimos:

$$-100 = s + gND_{\min}$$

$$100 = s + gND_{\max}$$

Sustituyendo en ambas formulas, los coeficientes se calculan como:

$$g = \frac{200}{ND_{\max} - ND_{\min}}$$

$$s = \frac{100ND_{\min}}{ND_{\min} - ND_{\max}(1 + 100)}$$

Expresado en un solo termino:

$$NP = \frac{100ND_{\min}}{ND_{\min} - ND_{\max}(1 + 100)} + \frac{200.ND}{ND_{\max} - ND_{\min}}$$

Ecuación 13. Nivel Porcentual de los valores de conciente multitemporal en escala logaritmica

Por lo tanto, en la imagen resultado del proceso de Cociente Multitemporal se obtuvieron valores de -100 a 100, donde cada valor digital representa un porcentaje aproximado de cambio del área de estudio.

3.3.4. Regresión Lineal multitemporal

En el marco conceptual del tratamiento digital de imágenes, en la normalización relativa, se trató esta técnica aplicada a la homogenización radiométrica entre las imágenes. En este método se aplicó la regresión lineal para estimar cuales serían los ND de los cambios existentes en la imagen de la segunda fecha.

“Se considera que la segunda fecha es una función de la primera, y que toda la desviación de la función estimada estaría representando el cambio” (Chuvieco 2002), por lo tanto los valores digitales de la segunda fecha se estima de la siguiente manera:

$$ND_{t_2} = a + b.ND_{t_1}$$

Ecuación 14. Regresión lineal multitemporal

Donde,

ND_{t_2} = Es el valor estimado de la segunda fecha (t_2),

a, b = Son coeficientes de regresión calculados sobre los ND de la primera fecha t_1 .

Estos valores serán aproximados a los valores reales de la segunda fecha, siempre que no se hayan producido cambio. Si existe algún cambio entre las imágenes, los ND reales de la segunda fecha presentarán valores alejados de los estimados por la regresión, por lo tanto presentarán altos residuales:

$$ND_c = ND_{t_2} - \hat{ND}_{t_2}$$

Ecuación 15. Residuales de la regresión multitemporal

Los coeficientes de regresión pueden calcularse para todos los ND de la imagen o a partir de un muestreo. Todo depende del funcionamiento aplicado en el tratamiento digital de la imagen.

Las imágenes que se sometieron a este proceso son las de 1991 y 2007 por tener una corrección radiométrica favorable en comparación con las imágenes de 1996 y en especial la del 2002 (ver Anexo 7).

3.4 FRAGMENTACIÓN DE STEENMANS Y PINBORG

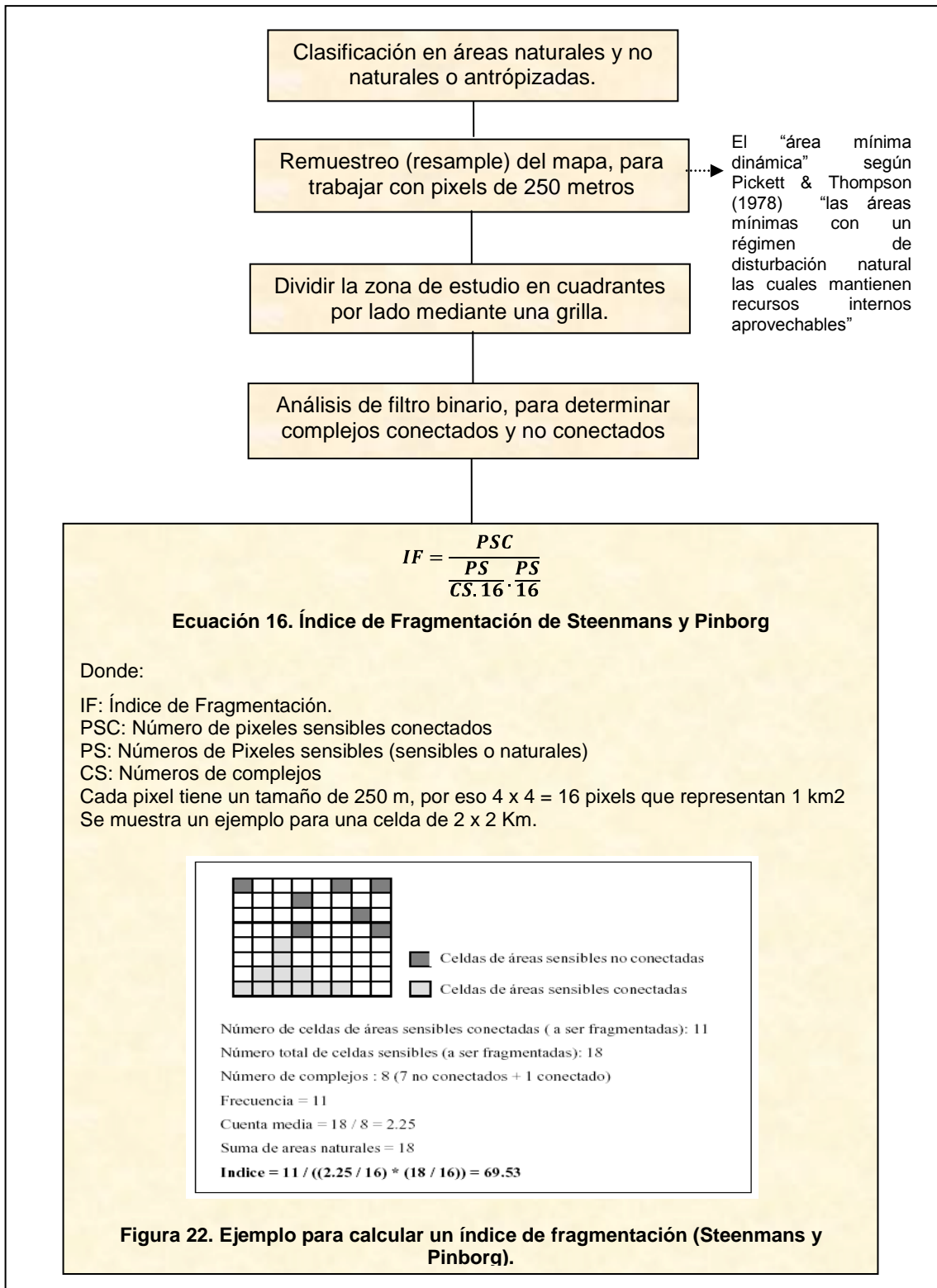


Diagrama 3. Metodología para el cálculo de índice de fragmentación de Steenmans y Pinborg

3.4.1.Leyenda de clasificación

Para la aplicación de este índice es importante disponer de una capa del uso de suelo del área, cuya nomenclatura sea apropiada para distinguir entre usos sensibles y usos no sensibles a la fragmentación. Usos sensibles son los espacios naturales y seminaturales, mientras que los no sensibles son espacios donde se acentúan las actividades humanas como elementos de presión sobre el medio ambiente. Algunos autores han incluido el agua en esta última categoría ya que tiene un carácter neutral, pero no es tomado en cuenta como sensible ya que albergan comunidades vegetales y animales que no están vinculadas al medio terrestre de agregación (Triviño et al., 2007).

Para este proceso es importante que la información esté en formato raster para realizar operaciones de vecindad que nos permita conocer el grado de conectividad entre los pixeles sensibles.

La clasificación de cobertura vegetal y uso del suelo del año 2007 fue elaborada por la Corporación Grupo Randi Randi mediante el uso de imágenes satelitales, visitas de campo y obtención de puntos GPS. Aquí, se determinó dos niveles de cobertura; 6 tipos de cobertura del nivel 1 y 18 tipos de cobertura del nivel 2. Las cuales se muestran a continuación:

Tabla 4. Clases de cobertura en el área de estudio

NIVEL 1	NIVEL 2
A).Vegetación natural	A.1.Bosque Andino
	A.2.Bosque de Polilepis
	A.3.Bosque Siempre Verde Montano Alto
	A.4.Matorral Seco
	A.5.Páramo de Frailejones
	A.6.Páramo de almohadillas
	A.7.Páramo Lacustre

B).Intervención Antrópica	B.1.Áreas Intervenidas
	B.2.Plantaciones Forestales
	B.3.Florícolas
C). Sin Vegetación	C.1.Suelo Desnudo
	C.2.Roca Desnuda
D). Agua	D.1.Cuerpos de Agua
E). Quemadas	E.1.Quema
F). Nieve	F.1Nieve

A.1.Bosque Andino.- Son bosques ubicados por encima de 1000 msnm, hasta un límite que puede estar hacia los 4000 msnm (ECOLAP y MAE, 2007), compuestas principalmente por árboles, arbustos donde las especies de edad maduran son predominantes.

A.2.Bosque de Polylepis.- Conocido como también como “árbol de papel” su corteza se descascara como láminas de papel, se visualiza valles de Polylepis en el páramo del Ángel.

A.3. Bosque Siempre Verde Montano Alto.- (2800 – 3100 msnm). Este bosque es similar al bosque de neblina montano en la cantidad de musgos y plantas epífitas; sin embargo, se diferencia por poseer un suelo cubierto por una densa capa de musgo y árboles que crecen irregularmente (Sierra, 1999).

A.4. Matorral Seco.- Toda vegetación donde presenta zonas o aéreas secas con diferentes formas de almacenar agua.

A.5. Páramo de Frailejones.-Se caracteriza por la presencia de frailejones que forman verdaderos bosques agrupándose con otras especies. Se conocen unas 45 especies en los páramos de Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela.

A.6. Páramo de Almohadillas.- Se encuentra en sitios más húmedos, saturado de agua, formadas por plantas en roseta y plantas en almohadillas.

A.7. Páramo Lacustre.- La vegetación es baja con flores pequeñas y de vivos colores.

B.1. Áreas intervenidas.- Áreas donde se encuentran asentamientos humanos, caminos y superficies artificiales.

B.2. Plantaciones Forestales.- Bosques cultivados para la comercialización en áreas naturales.

B.3. Florícolas.- Plantaciones de flores.

C.1. Suelo desnudo.- Suelo desnudo o erosionado por intervención antrópica.

C.2. Roca desnuda.- Canteras, peñascos, rocas y afloramientos rocosos.

D.1. Cuerpos de Agua.- conformado por vertientes, lagunas, ojos de agua etc.

E.1. Quema.- Ocasionadas naturalmente y por intervención humana.

F.1. Nieve.- Principalmente en el área de estudio se encuentra en el volcán Chiles

Esta leyenda no generó ningún problema en identificar los tipos de cobertura en el área de estudio ya que presenta un buen grado de generalización en la descripción. La escala de trabajo para determinar la leyenda fue a 1: 50 000.

Ver Anexo 8, Mapa 2.

3.4.2. Índice de fragmentación

Este índice ha sido comprobado a escala 1: 100.000 para el análisis del territorio europeo, posteriormente otros autores lo han aplicado a escala 1: 50.000 obteniendo resultados fiables. Este indicador plantea la fragmentación del espacio en términos de conectividad asumiendo varias operaciones de análisis espacial sustentadas en datos de tipo raster.

“Los análisis sobre la fragmentación de los hábitats en función de las especies animales y vegetales son una tarea extremadamente compleja, pudiéndose hacer una estimación más sencilla a partir de los usos de suelo.” (Triviño et al., 2007).

A partir de este concepto se han desarrollado indicadores ambientales para evaluar las actividades antropogénicas que intervienen en la biodiversidad analizando los usos del suelo y el grado de conectividad tanto de los espacios naturales como de los seminaturales.

El índice de fragmentación de Steenmans y Pinborg (2000) evalúa el grado de conectividad de los espacios sensibles de un área o zona que se ajustará a un cuadrado denominado grilla de cálculo. Esta grilla de cálculo dependerá de la extensión y forma del espacio geográfico, objeto de estudio y escala de trabajo.

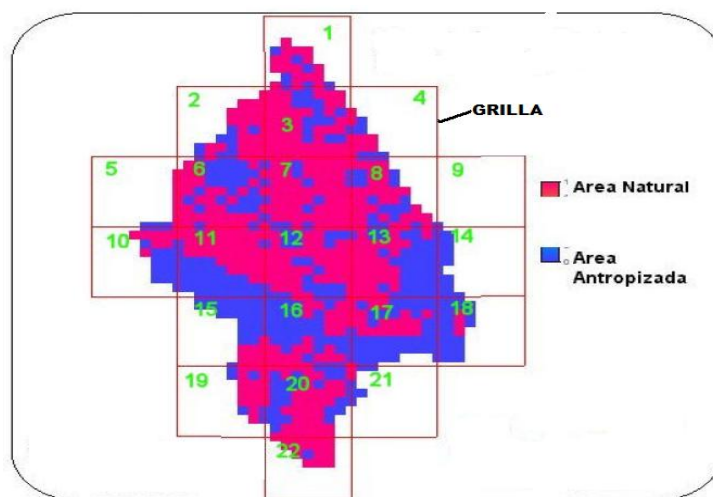


Figura 23. Grilla de cálculo (Troche, 2001)

En el artículo de “Análisis de sensibilidad a factores de escala y propuesta de normalización del índice de fragmentación de hábitats empleado por la agencia europea de medio ambiente” (Triviño et al., 2007), descrito en la revista GeoFocus, analiza estadísticamente la influencia que tiene las variaciones del tamaño del píxel y la grilla de cálculo en el índice de fragmentación, llegando a una conclusión que existe mayor variación por influencia de la resolución espacial, mientras que el tamaño de la grilla de cálculo no tiene mucha importancia en las modificaciones del índice.

En este artículo, el promedio de error más elevado se encontró en la grilla de cálculo de 2,5 x 2,5 km y 250 m de resolución espacial mientras que el promedio más pequeño corresponde a grillas de cálculo de 10 x 10 km con resolución espacial de 50 m. Es decir mientras más grande es la grilla de cálculo y más pequeño la resolución espacial menor error.

En la rasterización se toma en cuenta la unidad mínima cartografiada según la escala para definir la resolución espacial.

Steenmans y Pinborg (2000) realizaron el índice de fragmentación para escalas medias o nominales para el inventario del CLC a 1:100.000 siendo la unidad mínima cartografiada 25 hectáreas lo que corresponde a un cuadrado equivalente a 500 x 500 m. Así, se define un tamaño de pixel de 250 m de lado obtenido con la ayuda del teorema de muestreo, esta es la única resolución espacial que se emplea para el índice variando únicamente el tamaño de la grilla de cálculo. Consecuentemente estas resoluciones no pueden ser mayores de 250 metros y tampoco inferiores a los 25 metros de resolución que tiene el sensor remoto donde se obtuvo los datos (resolución del Landsat 7 ETM+ ASTER L1b).

En base a lo mencionado anteriormente, para este estudio se definió una grilla de 10 x 10 km con resolución espacial de 250m. De esta manera se dividió la zona de estudio en cuadrantes dentro de los cuales se determinó cuantos complejos naturales conectados y no conectados existen (ver Figura 34).

Se utilizó el filtro binario PEPPSALT (ILWIS 3.2) con cuatro conexiones con el fin de eliminar aquellas áreas naturales que se encontraran aisladas o sin una de las cuatro conexiones (arriba, abajo, izquierda y derecha) a otro pixel de área natural. Posteriormente se obtuvieron los histogramas de cada celda de trabajo, antes del filtro y después, para saber exactamente cuántos complejos conectados y no conectados existen en dicha celda. Luego se llevaron todos los valores obtenidos a una tabla de EXCEL para calcular el índice a partir de la Ecuación 16.

Los índices de fragmentación obtenidos fueron clasificados dentro de un rango de clases determinado según Steenmans y Pinborg (2000) que va de mínimo a extremo como muestra la siguiente tabla:

Tabla 5. Clasificación de la fragmentación según el valor del índice

Tipo de Fragmentación	Valor
Mínima	<0,01
Poca	0,01 – 0,1
Media	0,1 - 1
Moderada	1 - 10
Fuerte	10 - 100
Extrema	>100

A partir de estos índices se realizó el mapa del área de estudio con las clases de fragmentación. Ver Anexo 8 Mapa 7.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 CAMBIOS DE COBERTURA.

4.1.1 Composición multitemporal

En la composición de color multitemporal, se observó que los cambios ocurridos sobre la cobertura vegetal son muy notorios donde existe gran actividad agrícola.

Se puede observar en la Figura 24, el avance agrícola en los alrededores de la ciudad de El Ángel donde se presume que en los primeros años su dirección es al Este del territorio dándose a notar un suelo descubierto, pérdida de vegetación (color rojizo), a partir del 2002 presenta colores con aproximación a cian (representa cultivos donde existió suelo descubierto).

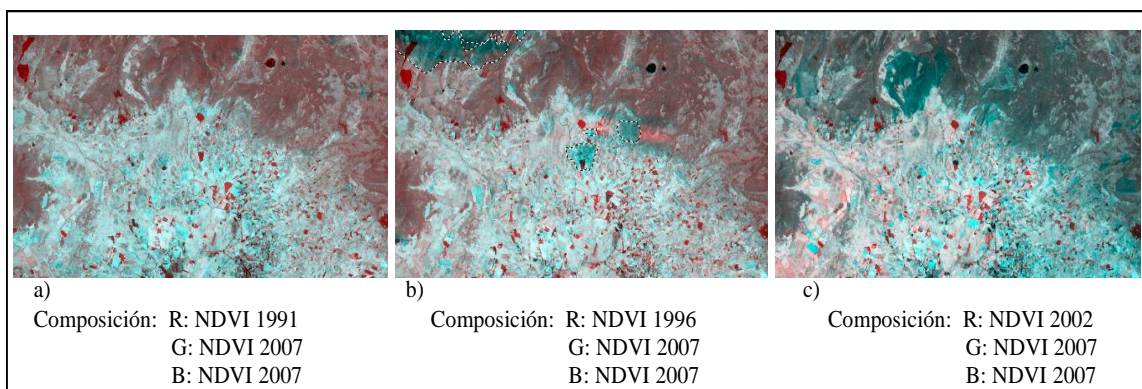


Figura 24. Composición de color multitemporal NDVI (El Ángel)

Las áreas donde existen nubes y sombras, fueron excluidas de su interpretación para evitar errores de omisión y comisión.

Esta interpretación es fundamentada en el instante que la composición de color multitemporal se realizó con la banda 4, ya que dicha banda representa gran aceptación lineal en los datos estadísticos de las zonas pseudoinvariantes (ver Anexo 6 Características de la Banda 4). De esta manera, la ganancia del color cian representa cultivos donde existió suelo descubierto y el color rojo la pérdida de vegetación.

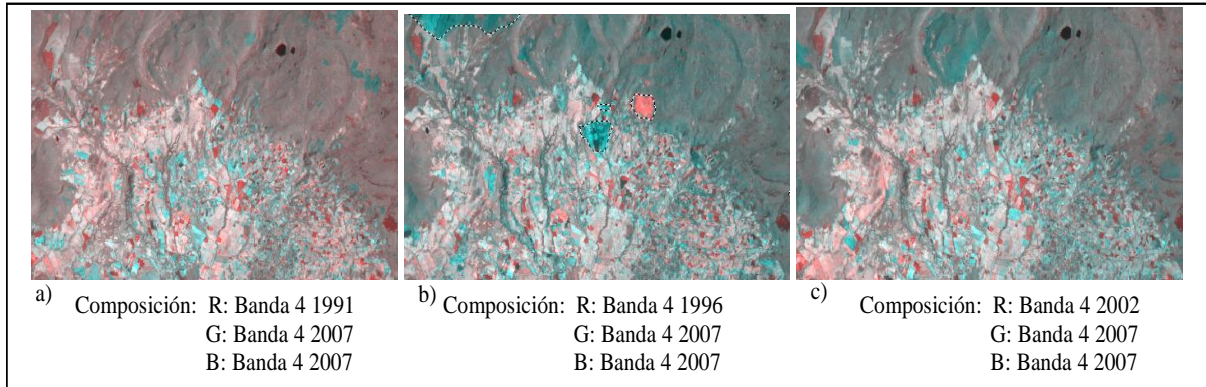


Figura 25. Composición de color multitemporal BANDA 4 (El Ángel)

Otro de los factores importantes que se visualizó con este método es la identificación de vías actuales o en construcción, que fueron detectadas en el campo y en la imagen donde se pudo distinguir notablemente en la combinación de color para las fechas del 1991 - 2007.

En la Figura 26 (A) resalta de color rojo los cambios que ha efectuado en el transcurso de los años, diferenciando las nubes se puede ver la vía que se está construyendo en la actualidad. Es decir que los valores de índice de vegetación de la imagen proyectada en el cañón rojo son mayores que en la imagen que se encuentra en el cañón verde y azul.

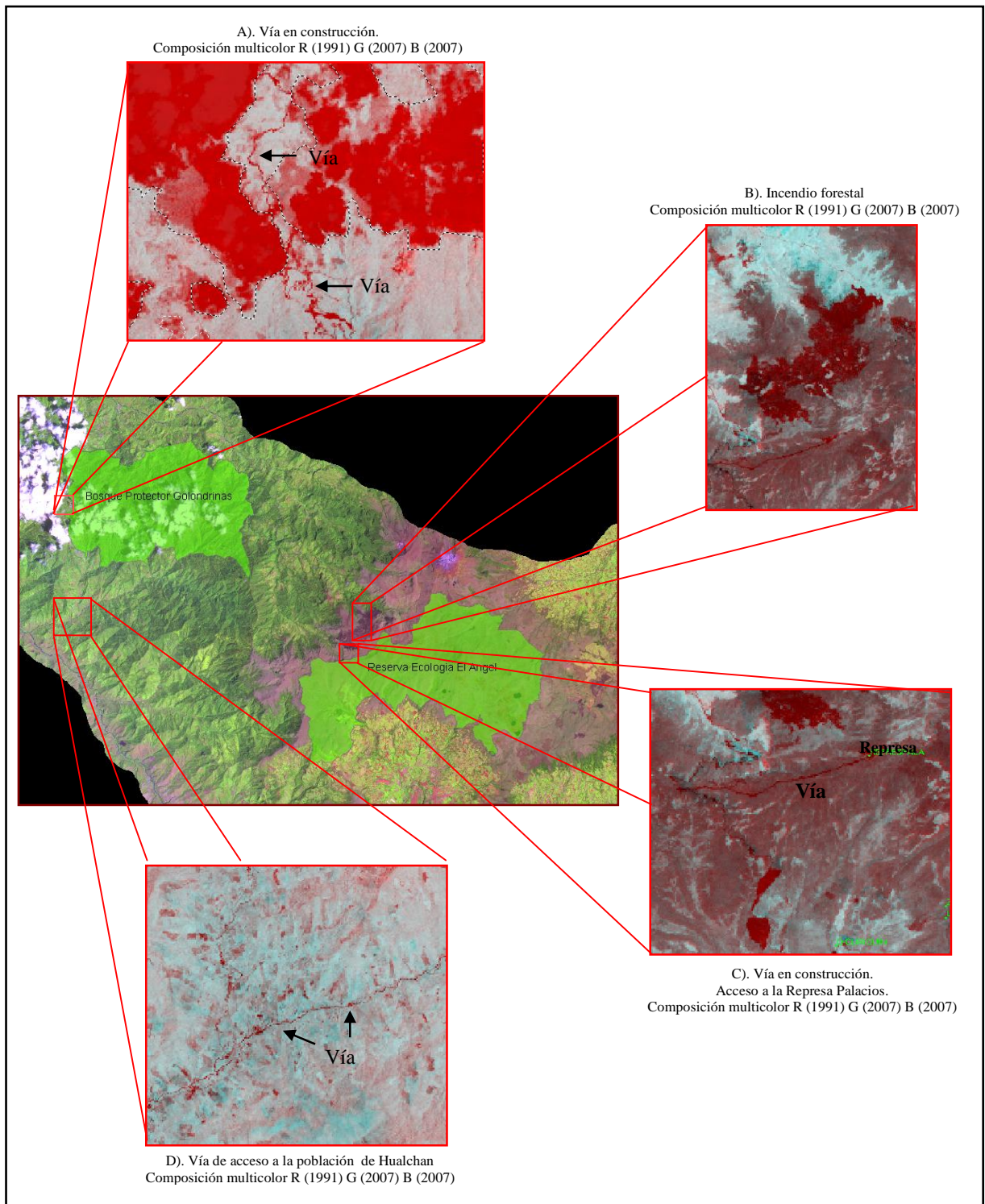


Figura 26. Características visuales en la composición de color multitemporal del área de estudio

Los tonos de coloración roja, (B), representa quemadas que fueron observadas en el campo y en la composición de las imágenes 1991 - 2007 donde se puede visualizar en la zona noroeste de la Reserva Ecológica El Ángel.

La vía que accede a la represa Palacios (C), en composición de color multitemporal se distingue de coloración roja, ésta fue construida en los últimos años para el ingreso de los trabajadores. Además, las zonas aledañas a los caminos construidos se pueden ver con tonalidad cian, zonas de posibles cultivos o fragmentos de los mismos, mientras que en tonalidades rojizas representan suelo descubierto, un ejemplo claro es la vía que va hacia Hualchan donde en sus alrededores presentan estas tonalidades (D).

En el año 1991, existió una pérdida de cobertura vegetal que se ha regenerado a través del tiempo hasta la actualidad. En la composición de color multitemporal R(1991), G(2007), B(2007), se puede visualizar esta transformación representada con la coloración cian debido a su regeneración (Figura 27; a), si invirtiéramos el orden cronológico en la presentación en los cañones R (2007), G(1991) B(1991), estos cambios ocurridos en el año de 1991 se visualizan de color rojizo representando el mismo fenómeno (Figura 27; b).

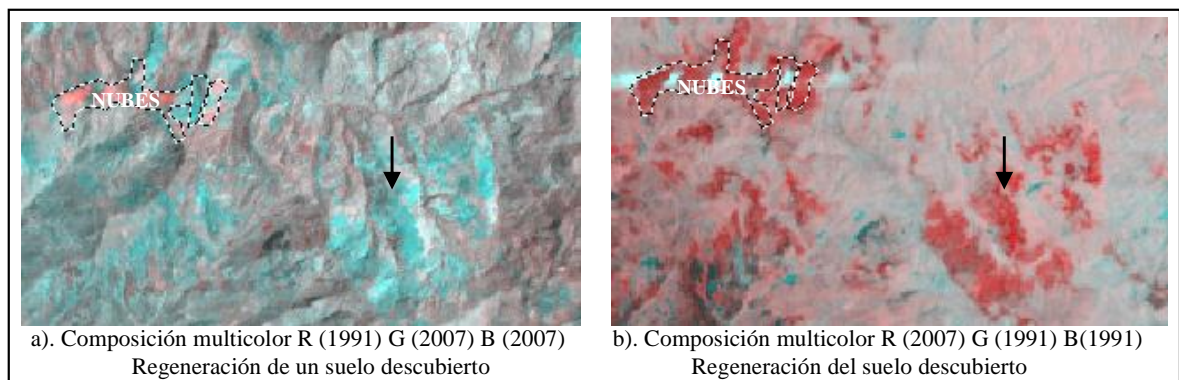


Figura 27. Composición de color multitemporal regeneración del suelo descubierto

Con el fin de representar este método se realizó un mapa de composición de color multitemporal entre los años 1991 y 2007; se los puede apreciar en el Anexo 8 Mapa 3.

4.1.2 Diferencia Multitemporal.

Con esta metodología se identifico áreas que han cambiado mediante la resta de NDVI de la imagen de la segunda fecha menos la primera; por lo tanto, se generó una imagen de datos continuos, a partir del cual se procedió analizar qué valor de los ND de la nueva imagen se considera como zona de cambio o zona inestable.

Las zonas estables presentan valores cercanos a cero, mientras que aquellas que experimentaron cambios son distintas a cero, positivos o negativos.

El valor del umbral para determinar zonas de cambio / no cambio, se lo determinó según la Ecuación 8, descrita en la metodología; en donde se obtuvo la gráfica de la distribución Gaussiana o normal de la diferencia entre imágenes como se indica en la siguiente figura.

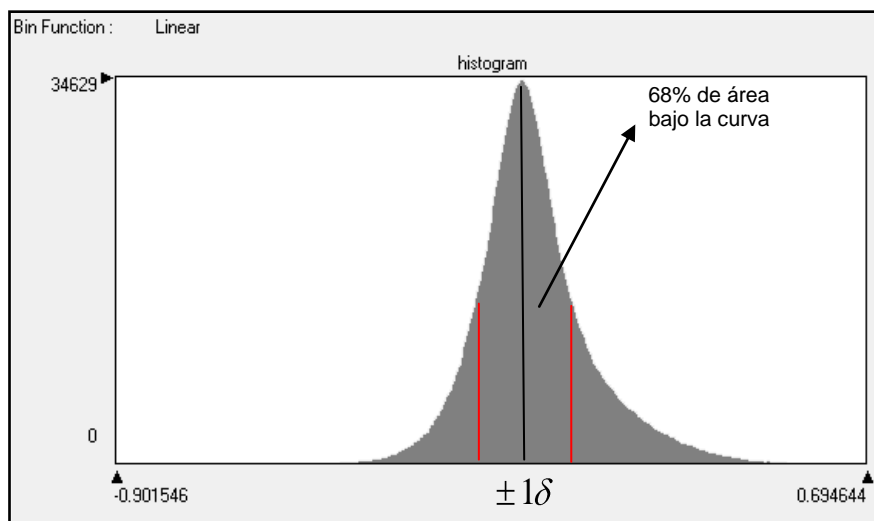


Figura 28. Histograma de diferencia multitemporal entre las imágenes del 2007 - 1991

En la siguiente tabla se muestra la media y desviación estándar de cada una de la diferencia entre imágenes:

Tabla 6. Media y desviación estándar de la diferencia multitemporal entre imágenes

<u>Diferencia</u>	2007-1991	2002-1996	2002-1991	1996-1991
media	-0,014	-0,173	-0,102	-0,027
desviacion estandar	0,138	0,253	0,276	0,153

Posteriormente, a partir de la Ecuación 9, se despejó la variable X_i obteniendo el umbral de cada una de las diferencias de imágenes tomando en cuenta que Z para 68% del área bajo la curva a partir de la media es 0,99458

Tabla 7. Umbral de cambio de la diferencia multitemporal entre imágenes

	2007-1991	2002-1996	2002-1991	1996-1991
umbral +-	0,1232525	0,07862958	0,172505	0,12517125

Para representar los valores de la diferencia entre la imagen del año 2007 y 1991, se clasificó los ND en cambio/no cambio en función del umbral (ver Anexo 8, Mapa 4).

4.1.3 Cociente multitemporal

Para este método se dividió los valores de reflectividad del NDVI de la imagen del 2007 para la de 1991, como resultado de esta división la imagen presentó valores sumamente altos y bajos. Utilizando la fórmula normalizada, el rango máximo es de 1650 y el mínimo de -89; mientras que para la fórmula sin normalizar se obtuvieron valores de 9 y -22 como valores máximo y mínimo respectivamente.

Esto complicó la interpretación de las imágenes por lo que se llegó a la conclusión de que los valores altos corresponden a píxeles de muy baja frecuencia. Al realizar un análisis del histograma se dedujo que estos resultados se dieron porque existe ruido en la imagen de 1991, dicho ruido no se diferenciaba con simplicidad por trabajar con valores de reflectividad ($-1 \leq ND \leq 1$), consecuentemente el módulo de corrección radiométrica no lo pudo detectar.

Con el fin de superar este inconveniente, se aplicó a las imágenes la Ecuación 12 (expansión lineal de los valores digitales), obteniendo como resultado valores cercanos a 1 si los ND de las fechas divididas son parecidas, mientras que mayores y menores a 1 si son ganancia y pérdida de valor digital respectivamente.

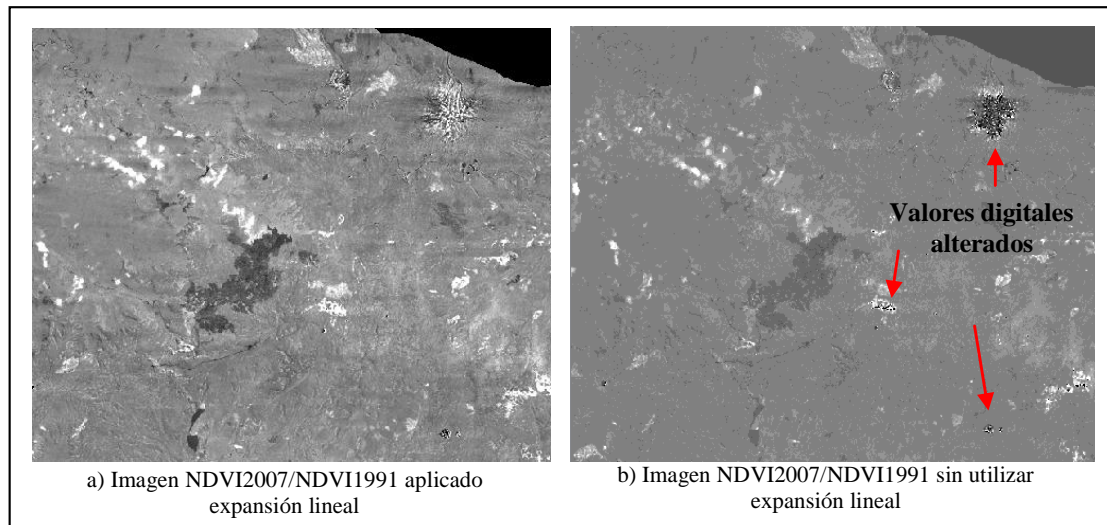


Figura 29. Cociente multitemporal con y sin expansión lineal

En la Figura 30 se puede observar el cociente multitemporal normalizado entre las imágenes de 1991 y 2007, para lo cual se aplicó la Ecuación 11 obteniendo el siguiente resultado:

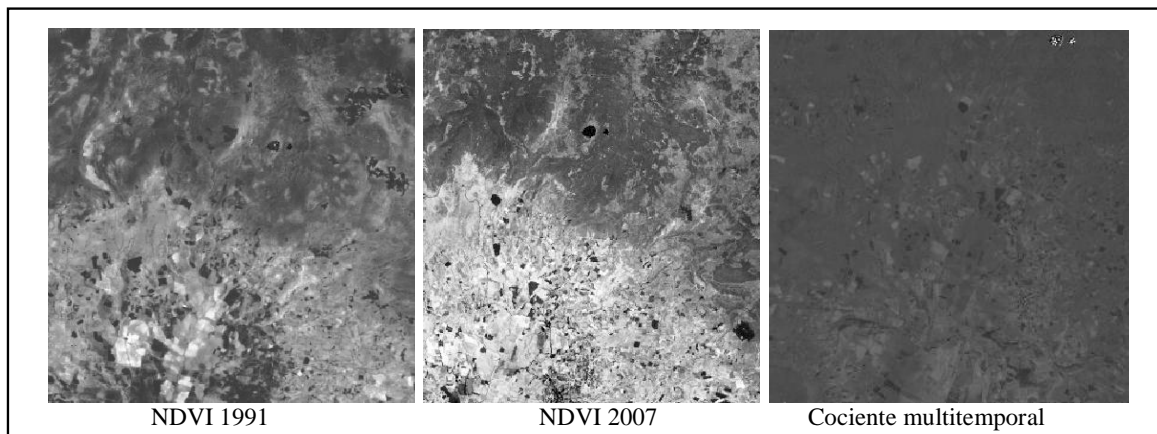


Figura 30. Cociente Multitemporal entre NDVI del 2007 y 1991

Con la conversión logarítmica, se consiguió valores de 0 a las zonas donde no existen cambios, mayores y menores a cero zonas que han ganado y perdido reflectividad; posteriormente, estos valores fueron sometidos a la Ecuación 13 para tener una referencia porcentual.

Como se puede ver en la Figura 31, en algunas áreas que han variado su valor digital se ve que el porcentaje de cambio es perceptible mientras que en otras se debe ser un poco más específico y determinar un valor promedio de cambio.

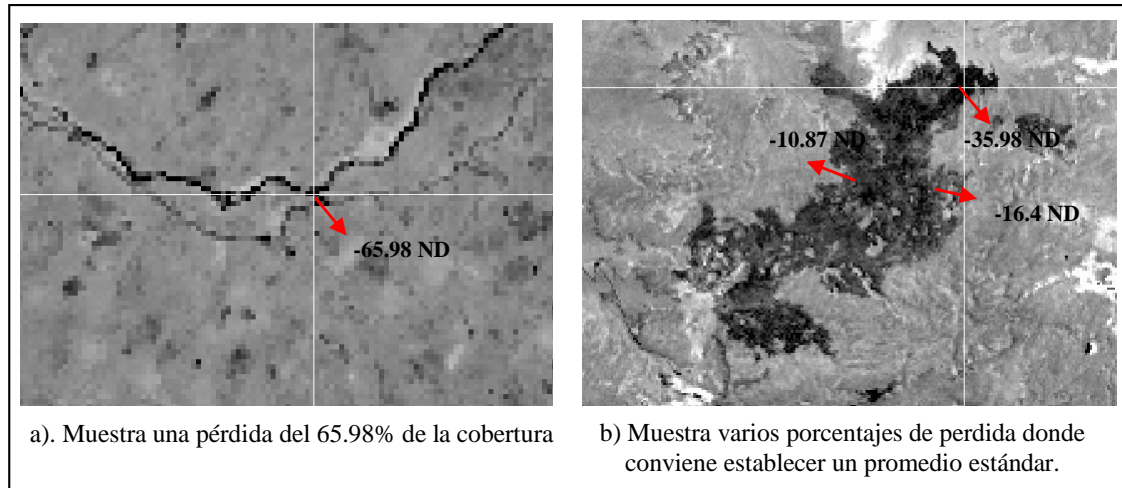


Figura 31. Imágenes NDVI2007/NDVI1991, muestra cambios de cobertura en porcentajes

Como resultado final de esta metodología se obtuvo una imagen con valores de cambio aproximado expresado en porcentaje; en donde el porcentaje varía entre 100 y -100% , los valores negativos representa pérdida de cobertura vegetal. En el Anexo 8, Mapa 5 se representan estos valores porcentuales para una mejor interpretación del resultado obtenido.

4.1.4 Regresión Lineal

Las imágenes que se sometieron a esta metodología, presentaba diferentes características, por lo tanto, antes de realizar la regresión lineal se definió el área con la cual se someterían todos los valores digitales para obtener los coeficientes (a y b) evitando alterarlos (Ecuación 14). Es decir, se escogió un área donde no exista intervención de las nubes, bruma, etc., que abarque la zona de interés y también que facilite obtener los valores digitales de forma matricial tanto para la primera y segunda fecha.

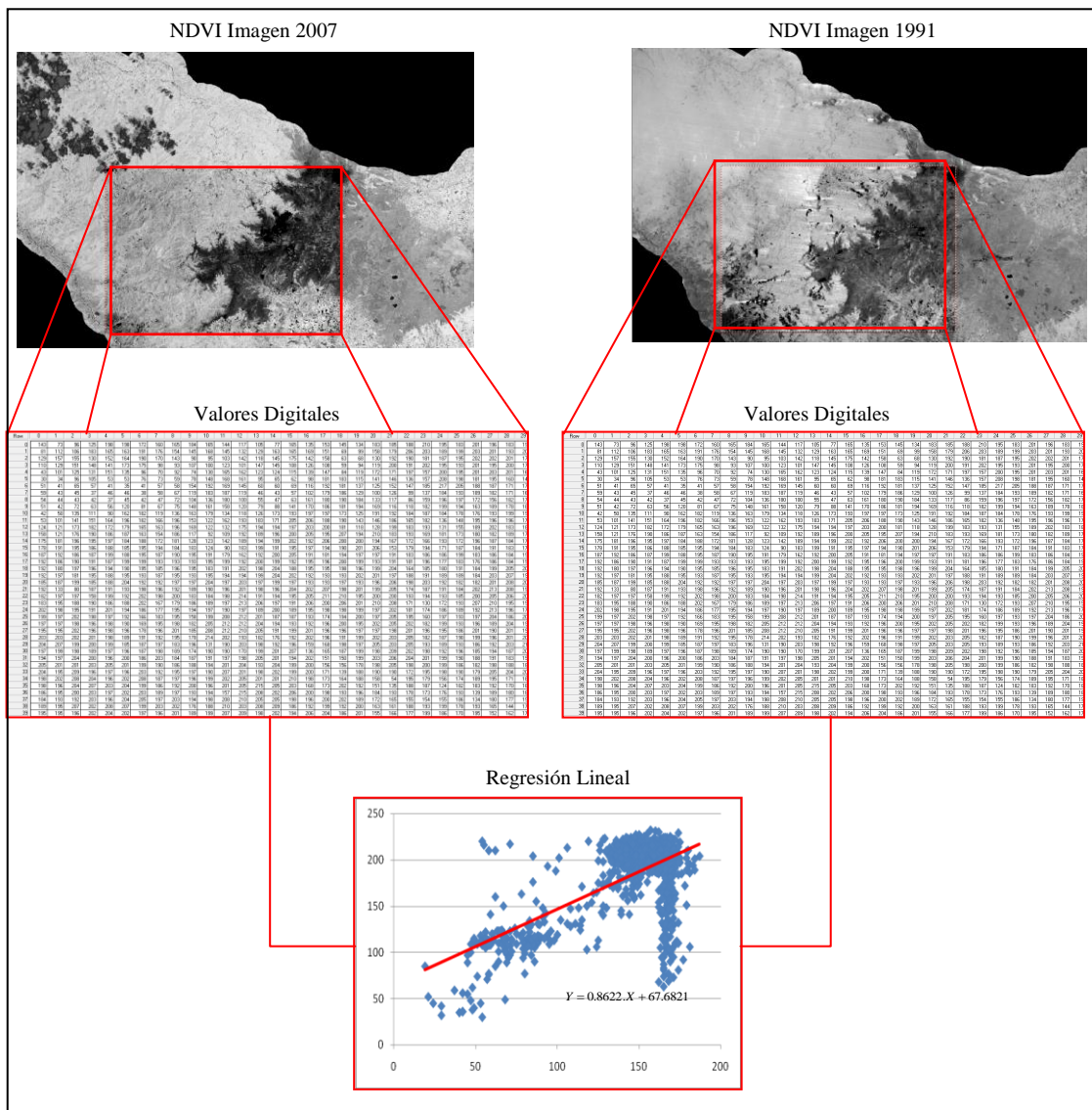


Figura 32. Aplicación del método de Regresión Lineal en el análisis multitemporal de las imágenes de 1991 y 2007

Los coeficientes de regresión pueden calcularse para todos los ND de la imagen o a partir de un muestreo, en este caso se especificó un área importante de la zona que es parte del corredor de conservación comunitaria.

La regresión entre los NDVI de las dos fechas se obtuvo un coeficiente de determinación (r^2) de 45,24% con la siguiente regresión:

$$\hat{ND}_{2007} = 0.8622.ND_{1991} + 67.6821$$

En total se evaluó 142.333 valores digitales por cada una de las imágenes.

Posteriormente, se restó de la imagen original para obtener los residuales (Ecuación 15);

$$ND_{residual} 2007 = ND_{2007} - \hat{ND}_{2007}$$

“Esta imagen de residuales nos informa de los principales cambios producidos, tanto en su intensidad (valor), como su sentido (signo)” (Chuvieco, 2002)

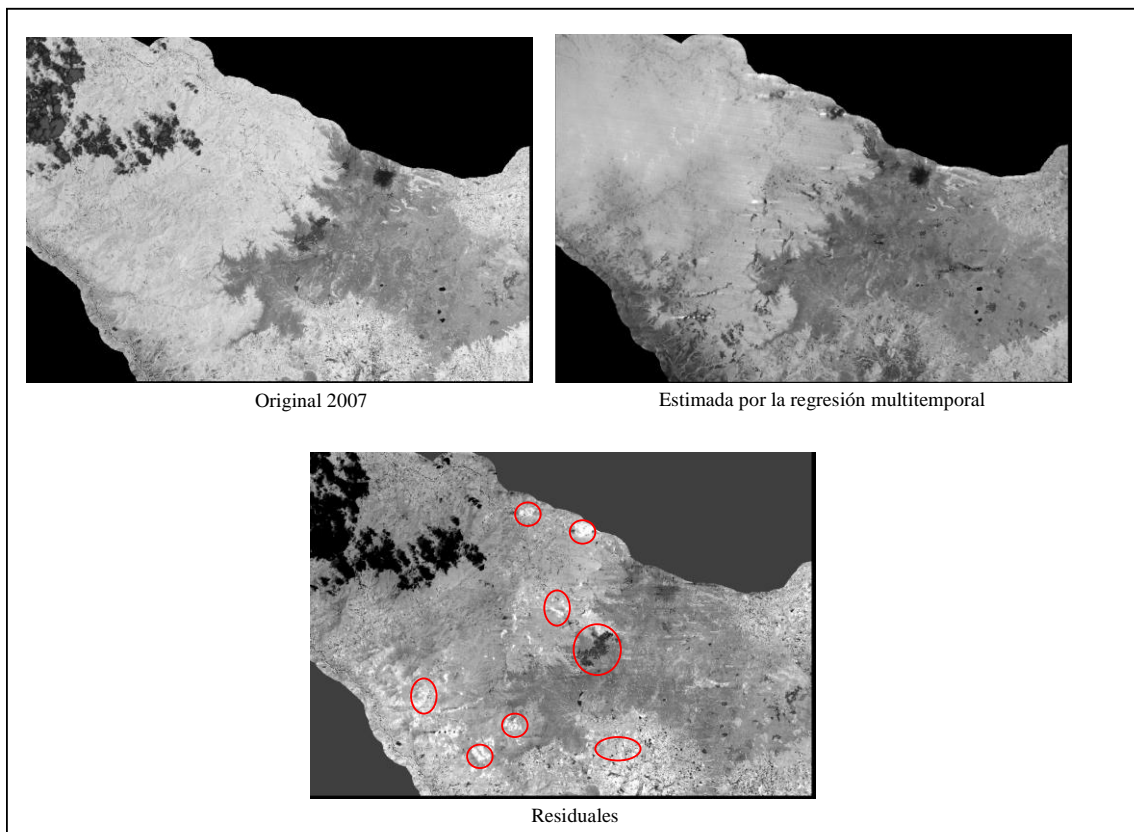


Figura 33. Regresión multitemporal; en la imagen de los residuales se señalan con círculos los cambios más evidentes.

El resultado de esta metodología se puede observar en el Anexo 8 Mapa 6.

4.2 ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN

Al generalizar el mapa de cobertura en áreas naturales (sensibles) y antropizadas (no sensibles), en la Figura 34, se observa claramente la distribución de áreas antropizadas en todo el área de estudio de lo cual se puede deducir la importante presión que ejercen éstas sobre las áreas naturales.

Para la realización de este método se generó una grilla formada por 21 celdas de cálculo de 10 x 10 km; para cada una de ellas se calculó el índice de fragmentación.

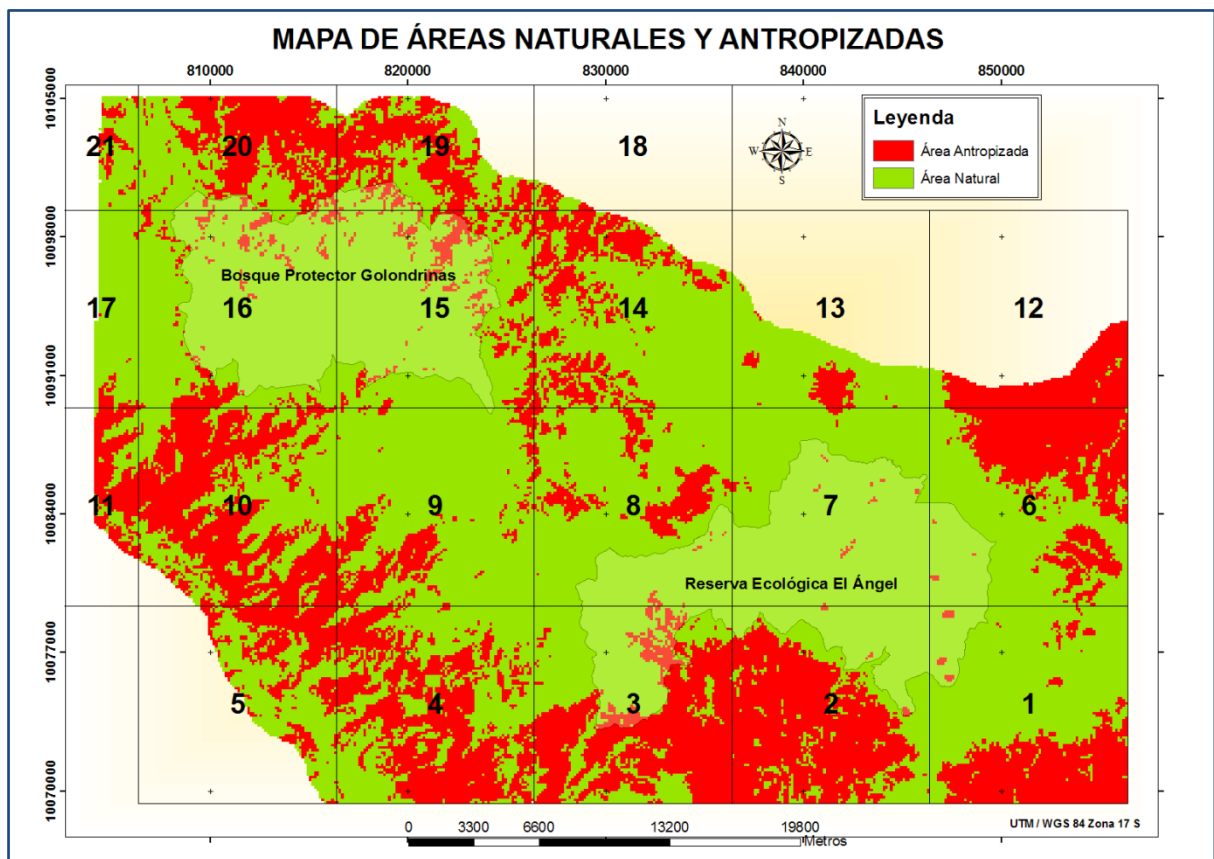


Figura 34. Mapa de Áreas Naturales y Antropizadas

Los índices fueron clasificados dentro del rango de clases utilizado por Steenmans y Pinborg (2000) de la Tabla 5. Clasificación de la fragmentación según el valor del índice.

Según la Tabla 8, el 55,68 % del área de estudio (aprox. 79743,750 ha) presenta una fragmentación moderada, por otro lado la fragmentación fuerte abarca el 30,36% (aprox. 43475 ha) y finalmente las zonas que presentaron una fragmentación media corresponden al 13,97% (aprox. 20000 ha).

Tabla 8. Índices de Fragmentación del Área de Estudio

CELDA DE	INDICE DE FRAGMENTACION	Área Ocupada	Porcentaje %	Clasificación
CALCULO	IF	ha	Área	IF
1	3,392	10000	6,982	Moderada
2	17,368	10000	6,982	Fuerte
3	9,547	10000	6,982	Moderada
4	13,591	10000	6,982	Fuerte
5	7,182	4137,5	2,889	Moderada
6	6,640	10000	6,982	Moderada
7	0,162	10000	6,982	Media
8	1,485	10000	6,982	Moderada
9	2,412	10000	6,982	Moderada
10	19,247	9625	6,720	Fuerte
11	36,389	1543,75	1,078	Fuerte
12	32,875	1968,75	1,375	Fuerte
13	1,593	3412,5	2,383	Moderada
14	6,344	8931,25	6,236	Moderada
15	2,013	10000	6,982	Moderada
16	0,175	10000	6,982	Media
17	1,615	2112,5	1,475	Moderada
18	55,147	250	0,175	Fuerte
19	25,742	4387,5	3,063	Fuerte
20	14,472	5700	3,980	Fuerte
21	1,842	1150	0,803	Moderada
Promedio	12,344			Fuerte

Con los resultados obtenidos anteriormente, del índice de fragmentación por celdas, se pudieron ubicar las zonas que representaban una fragmentación media, moderada y fuerte, con dicha información se genero el mapa final del grado de fragmentación del área de estudio (Ver Anexo 8, Mapa 7).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El tratamiento digital se realizó con cuatro imágenes satelitales de distinto sensor aplicando las correcciones radiométricas y geométricas dependiendo de las características de cada una de ellas. Además, se utilizó regresiones lineales para una homogenización relativa que garanticen la estandarización de los valores de reflectividad.
- A pesar de los esfuerzos realizados en el tratamiento digital de las imágenes satelitales, los valores de reflectividad de las zonas pseudoinvariantes de la imagen correspondiente al año 2002, no alcanzaron una relación propicia con las demás imágenes por lo que se evitó el uso de dicha imagen en los métodos de cambio de cobertura. Cabe señalar que la imagen del 2002 se obtuvo sin costo del internet.
- Es importante tomar en cuenta que los parámetros de calibración de cada una de las imágenes son valores únicos de cada sensor, fundamentales para correcciones absolutas.
- Con cada una de las metodologías de cambio de cobertura utilizadas para este estudio, se obtuvieron resultados que coinciden con las alteraciones reales del área; dichas metodologías alcanzaron un distinto nivel de detalle.

- En la metodología de Composición de color multitemporal, para el análisis del cambio de cobertura, depende mucho del orden cronológico que se proyecten en los cañones de visualización, y además, con qué valores se pretende trabajar, si es con NDVI u otros índices.
- En la metodología de Diferencia Multitemporal, se observa en tonos oscuros las zonas donde el decremento de NDVI ha sido más intenso, esto coincide bastante bien con las zonas quemadas, mientras que los tonos grises medios corresponden a zonas que no han alterado su cubierta vegetal entre las fechas de comparación.
- El método de Diferencia Multitemporal se dificultó el analizar, porque solamente se expresan como áreas de cambio sin indicar el sentido ni en la proporción en la que se están ejecutando. Además, presenta dificultad de establecer umbrales o rangos para definir a partir de cual valor en el pixel se debe considerar que existe cambio o que ha ocurrido alguno. No existe una metodología definida para analizar qué valor se debe considerar como cambio.
- La metodología de Cociente Multitemporal ofrece la significación del cambio frente a los valores originales; facilitando así, la interpretación del nivel de pérdida o ganancia de cobertura en la zona de estudio.
- En la metodología de Regresión Multitemporal, con la imagen de residuales se puede obtener umbrales de cambio y no cambio, y puede ser tratada posteriormente de manera similar a la metodología de diferencia multitemporal.
- Con las cuatro metodologías se logro localizar áreas en la que su cobertura ha cambiado entre los años 1991 y 2007, prueba de aquello es la ubicación de una zona de incendio forestal ocurrido en el año 2007 verificado en el campo.

- Las zonas con mayor accesibilidad topográfica o vial, presentan cambios de cobertura, detectados con las 4 metodologías aplicadas; por ejemplo las zonas aledañas a la ciudad de el Ángel ubicada al sur este del área de estudio.
- Las metodologías evaluadas en el presente estudio no representan las únicas existentes.
- Para la representación de los cuatro métodos de cambio de cobertura en cada uno de los mapas, se trabajo específicamente con las imágenes de 1991 y 2007 ya que tienen una relación espacial óptima y no contiene mucha nubosidad en el área de estudio.
- La metodología de Steenmans y Pinborg generó resultados afines en el área de estudio; denotando así, una menor fragmentación en las áreas de conservación El Ángel y Bosque Golondrinas, en comparación con las zonas aledañas a ellas.
- Entre las áreas de conservación de El Ángel y Bosque Golondrinas, según el cálculo del índice, existe una fragmentación de cobertura moderada ocupando el 55,68% del área total; adecuada para proyectos de conservación comunitaria.
- En las áreas aledañas a las reservas presentan una fragmentación fuerte debido a la intervención antrópica ocupando el 30,36% del área total.

5.2 RECOMENDACIONES

- Es preferible trabajar con imágenes de un mismo sensor y plataforma, para evitar los errores de homogenización radiométrica.
- Si se trabaja con imágenes de distinto sensor, se recomienda utilizar no solo el método de homogenización atmosférico de Chaves 1996, sino aplicar otros modelos de ajuste como, regresión lineal, aplicaciones con Mars (programa estadístico), etc.
- Es preferible analizar los valores y definir parámetros previos para obtener buenos resultados en la metodología de cambio de cobertura o índice de fragmentación.
- En las metodologías de cambio de cobertura es recomendable definir con anterioridad que tipo de imagen van a someterse a este proceso, bien puede ser con índices o con bandas seleccionadas de acuerdo a los objetivos de estudio.
- De acuerdo al índice de fragmentación, se recomienda elaborar proyectos en las zonas de fragmentación moderada, justificando así el proyecto de conservación de corredor comunitario, en donde, este tipo de fragmentación comprende entre las Áreas Protegidas.
- Se recomienda controlar las actividades humanas donde se indica un índice de fragmentación fuerte.
- Se debe enfocar los análisis de imágenes hacia la implementación de técnicas favorables en el tratamiento digital, para una mejor homogenización entre valores de reflectividad provenientes de distinto sensor.

ANEXOS

1. CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES SATELITALES

Landsat 5 TM		
Bandas	Rango espectral (um)	IFOV (m)
1	0,45 - 0,52	30x30
2	0,52 - 0,60	30x30
3	0,63 - 0,69	30x30
4	0,76 - 0,90	30x30
5	1,55 - 1,75	30x30
6	10,4 - 12-5	120x120
7	2,08 - 2,35	30x30

Landsat 7 ETM+		
Bandas	Rango espectral (um)	IFOV (m)
1	0,45 - 0,52	30x30
2	0,52 - 0,60	30x30
3	0,63 - 0,69	30x30
4	0,76 - 0,90	30x30
5	1,55 - 1,75	30x30
6	10,4 - 12-5	120x120
7	2,08 - 2,35	30x30
Pancromática	0,50 - 0,70	15x15

ASTER L1b		
Bandas	Rango espectral (um)	IFOV (m)
1	0,52 - 0,60	15
2	0,63 - 0,69	15
3N	0,76 - 0,86	15
3B	0,76 - 0,86	15
4	1,60 - 1,70	30
5	2,145 - 2,185	30
6	2,185 - 2,225	30
7	2,235 - 2,285	30
8	2,295 - 2,365	30
9	2,360 - 2,430	30
10	8,125 - 8,475	90
11	8,475 - 8,835	90
12	8,925 - 9,275	90
13	1,025 - 1,095	90
14	1,095 - 1,165	90

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES SATELITALES ADQUIRIDAS

Parámetros de la Imagen LANDSAT5 TM 1996		
Bandas	ND mínimo imagen	Características
B3	1	Sun Elevation 47,17°
B4	6	Sun Azimuth = 62,02°
B5	4	Ang Cenital = 42,83°
		Día Juliano = 206
		Factor Distan: 1,031509

Parámetros de la Imagen LANDSAT 5 TM 1991				
Bandas	ND mínimo imagen sep	ND mínimo imagen octub	Características imagen sept	Características imagen octub
B1	65	49	Sun Elevation 55°	Sun Elevation 56°
B2	26	20	Sun Azimuth : 85°	Sun Azimuth : 107°
B3	25	18	Ang Cenital = 35°	Ang Cenital = 34°
B4	21	21	Día Juliano = 256	Día Juliano = 288
B5	9	10	Factor Distan: 1,01133	Factor Distan: 0,993144
B6	76	37		
B7	4	4		

Parámetros de la Imagen LANDSAT 7 ETM 2002		
Bandas	ND mínimo imagen	Características
B1	42	Sun Elevation = 59,5616°
B2	26	Sun Azimuth = 75,0566°
B3	19	Ang Cenital = 30,4384387°
B4	11	Día Juliano = 102
B5	10	Factor Distancia (K) = 1,004887
B6	45	
B7	8	
B8	3	

Parámetros de la Imagen ASTER L1B 2007		
Bandas	ND mínimo imagen	Características
B1	37	Sun Elevation = 59,76095°
B2	18	Sun Azimuth = 125,0325°
B3N	23	Ang Cenital = 30,23905°
B3B		Día Juliano = 36
B4	12	Factor Distancia (K) = 0,97220903
B5	14	
B6	12	
B7	11	
B8	10	
B9	14	

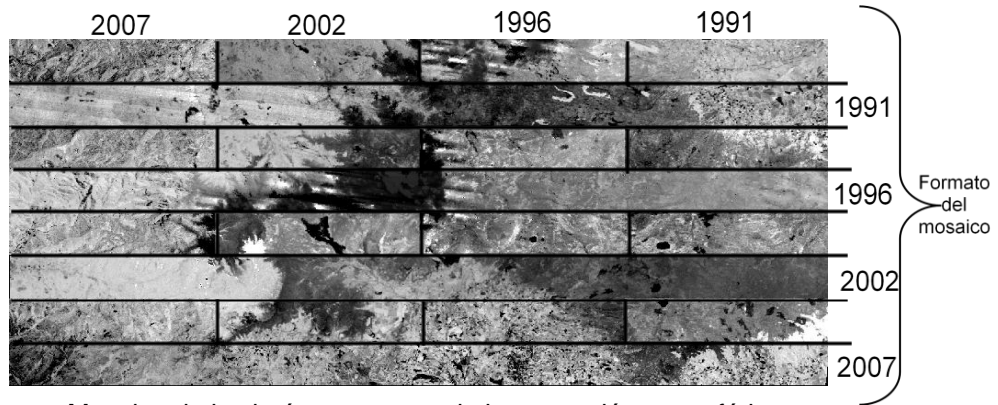
3. PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES

Parametros de Calibracion Imagen LADSAT 5 TM					
Bandas	Parametros	a o,k	a1,k	Eok	Tki
B1		-1,5	0,6024	1957	0,7
B2		-2,8	1,1749	1829	0,78
B3		-1,2	0,8059	1557	0,85
B4		-1,5	0,8145	1047	0,91
B5		-0,37	0,1081	219,3	1
B6		1,2378	0,0552		
B7		-0,15	0,057	74,52	1

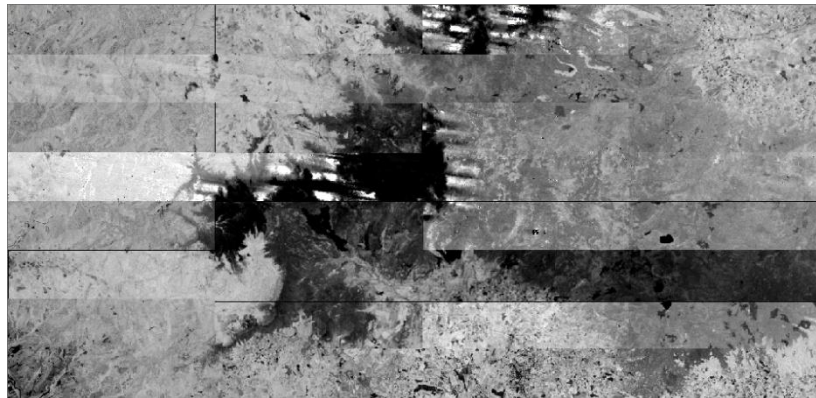
Parametros de Calibracion Imagen LADSAT 7 ETM					
Bandas	Parametros	a o,k	a1,k	Eok	Tki
B1		-6,2	1,176	1957	0,7
B2		-6,4	1,205	1829	0,78
B3		-5	0,938	1557	0,85
B4		-5,1	0,965	1047	0,91
B5		-1	0,191	219,3	1
B6					
B7		-0,35	0,066	74,52	1
B8					

Parametros de Calibracion Imagen ASTER L1B					
Bandas	Parametros	a o,k	a1,k	Eok	Tki
B1		-0,676	0,676	1846	0,78
B2		-0,708	0,708	1555	0,85
B3N		-0,862	0,862	1120	0,91
B3B		-0,862	0,862	1120	0,91
B4		-0,2174	0,2174	231	1
B5		-0,0696	0,0696	79	1
B6		-0,0625	0,0625	74,4	1
B7		-0,0597	0,0597	70,5	1
B8		-0,0417	0,0417	59,6	1
B9		-0,0318	0,0318	56,3	1

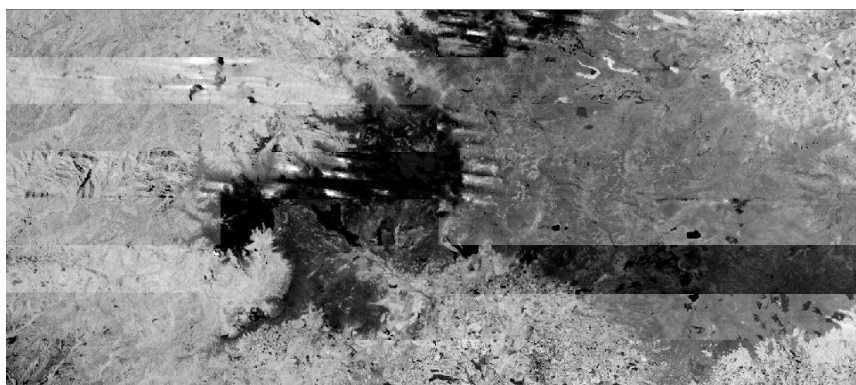
4. MOSAICO DE LAS IMÁGENES SATELITALES DURANTE EL PROCESO DE TRATAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES.



Mosaico de las imágenes antes de la corrección atmosférica



Mosaico de las imágenes corregidas atmosféricamente (Chavez 1996)



Mosaico de las imágenes normalizadas (Ajuste Lineal)

Metodología basada en Darren T et al, 2006.

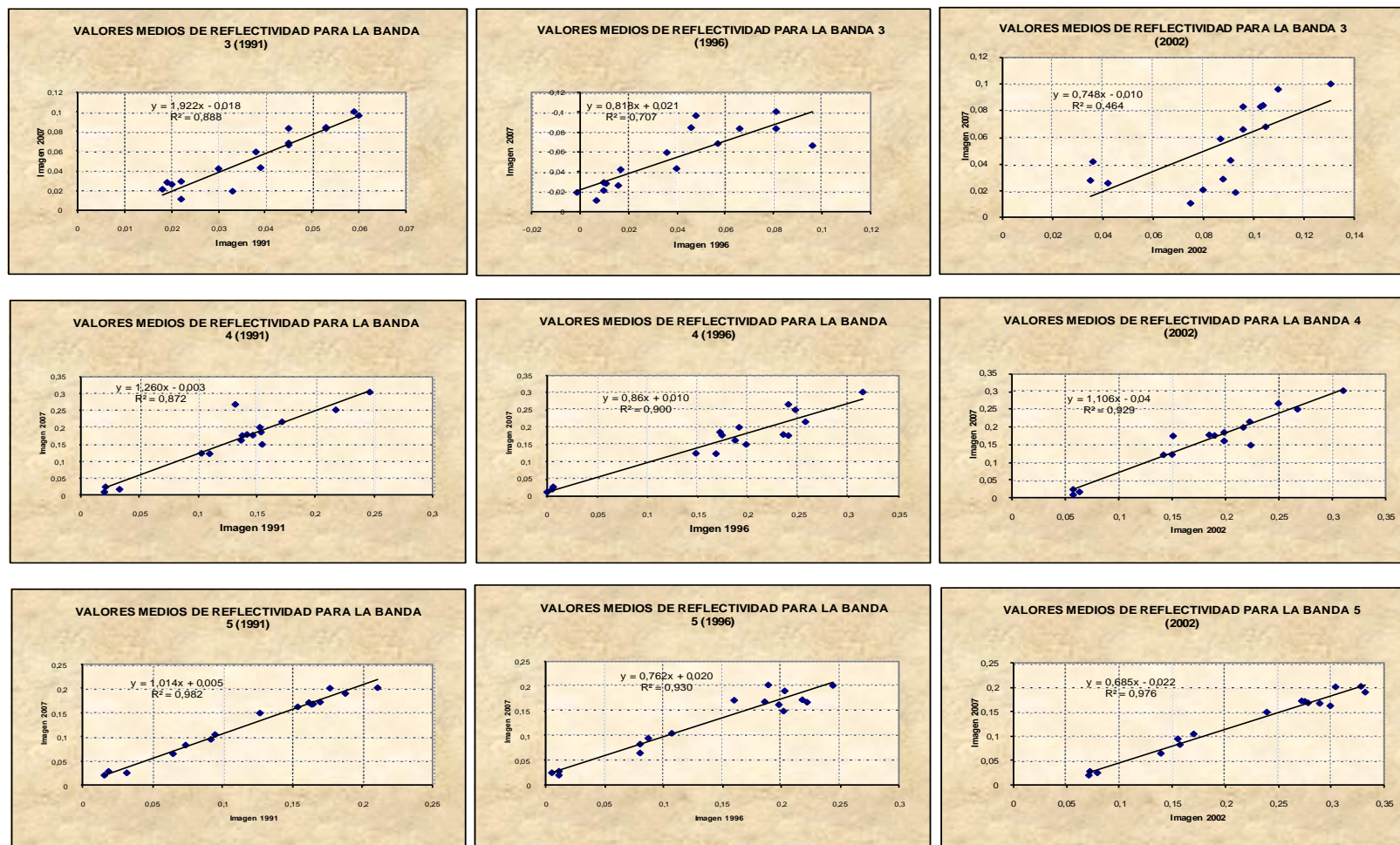
5. MEDIA DE LOS VALORES DE REFLECTANCIA PARA CADA BANDA POR MUESTRAS PSEUDO INVARIANTE

MEDIA DE LOS VALORES DE REFLECTIVIDAD PARA LA BANDA 3																
Imagen	Muestra 1 Media	Muestra 2 Media	Muestra 3 Media	Muestra 4 Media	Muestra 5 Media	Muestra 6 Media	Muestra 7 Media	Muestra 8 Media	Muestra 9 Media	Muestra 10 Media	Muestra 11 Media	Muestra 12 Media	Muestra 13 Media	Muestra 14 Media	Muestra 15 Media	Muestra 16 Media
1991	0,022	0,033	0,022	0,038	0,02	0,045	0,03	0,045	0,06	0,053	0,053	0,059	0,039	0,018	0,019	0,045
1996	0,01	-0,001	0,007	0,036	0,016	0,057	0,017	0,066	0,048	0,046	0,081	0,081	0,04	0,01	0,011	0,096
2002	0,088	0,093	0,075	0,087	0,042	0,105	0,036	0,096	0,11	0,104	0,103	0,131	0,091	0,08	0,035	0,096
2007	0,029	0,019	0,011	0,059	0,026	0,068	0,042	0,083	0,096	0,084	0,083	0,1	0,043	0,021	0,028	0,066

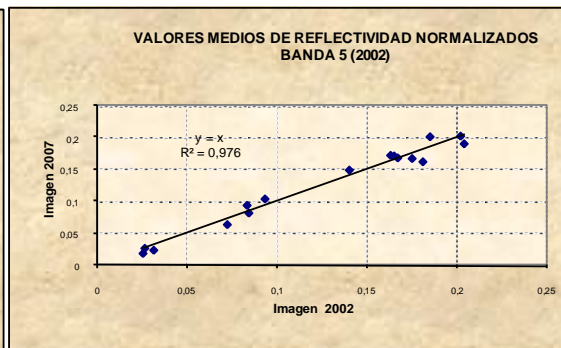
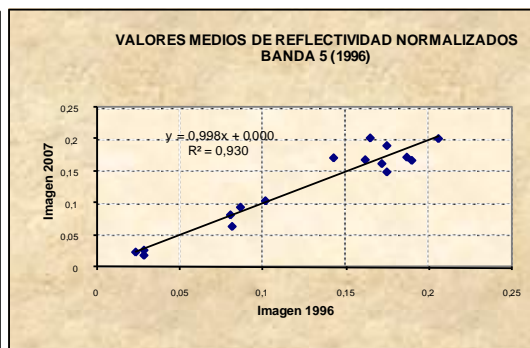
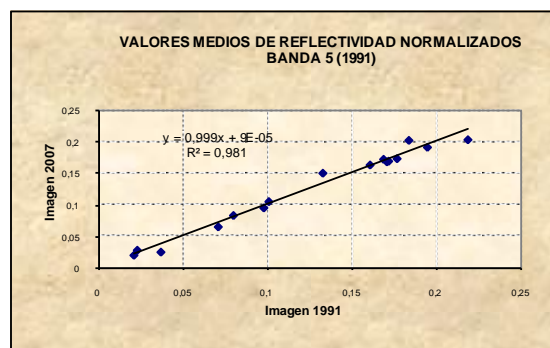
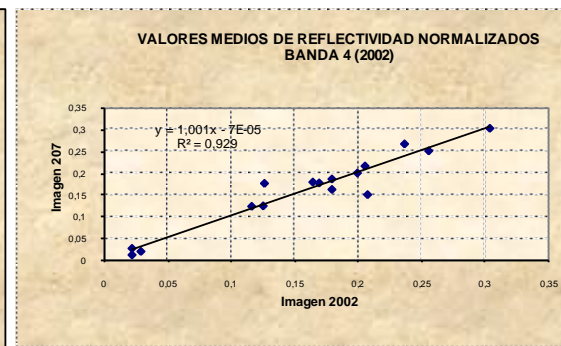
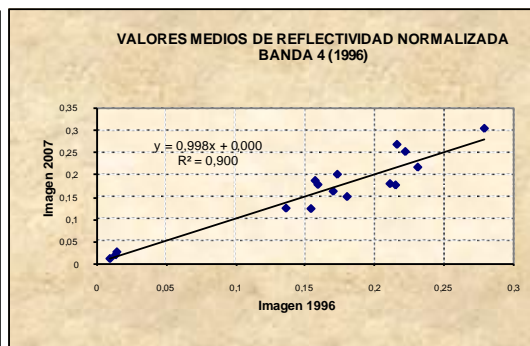
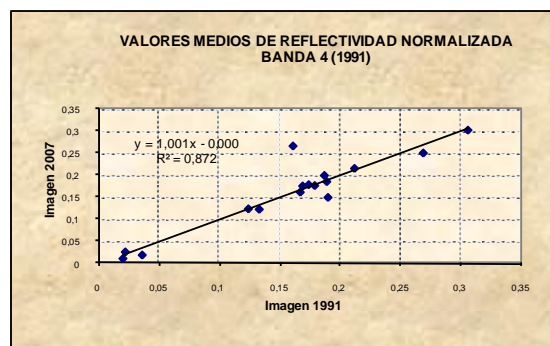
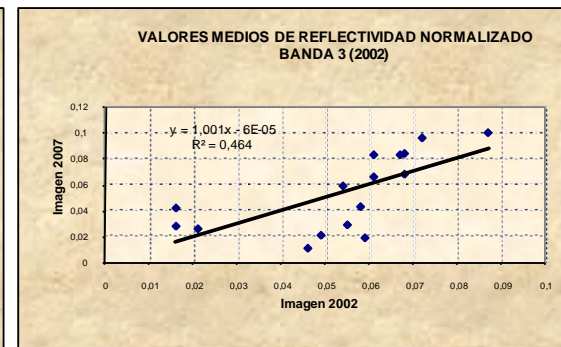
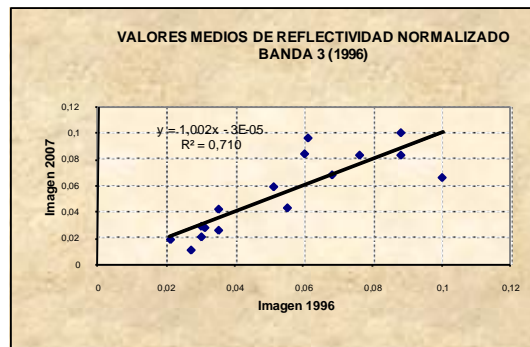
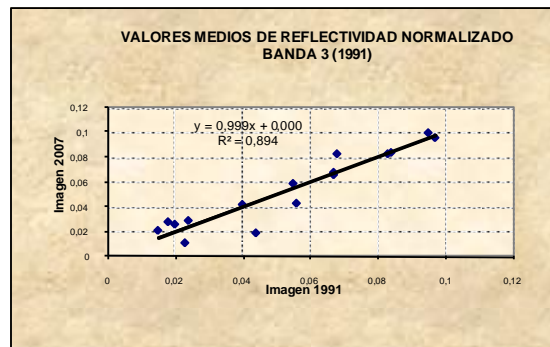
MEDIA DE LOS VALORES DE REFLECTIVIDAD PARA LA BANDA 4																
Imagen	Muestra 1 Media	Muestra 2 Media	Muestra 3 Media	Muestra 4 Media	Muestra 5 Media	Muestra 6 Media	Muestra 7 Media	Muestra 8 Media	Muestra 9 Media	Muestra 10 Media	Muestra 11 Media	Muestra 12 Media	Muestra 13 Media	Muestra 14 Media	Muestra 15 Media	Muestra 16 Media
1991	0,02	0,032	0,019	0,102	0,153	0,136	0,217	0,137	0,131	0,146	0,141	0,171	0,246	0,152	0,154	0,109
1996	0,006	0,005	0	0,148	0,172	0,187	0,247	0,24	0,24	0,174	0,235	0,257	0,314	0,191	0,198	0,168
2002	0,057	0,063	0,057	0,15	0,199	0,199	0,268	0,151	0,25	0,19	0,185	0,223	0,311	0,217	0,224	0,142
2007	0,025	0,018	0,01	0,123	0,185	0,161	0,25	0,175	0,266	0,176	0,178	0,215	0,302	0,199	0,149	0,122

MEDIA DE LOS VALORES DE REFLECTIVIDAD PARA LA BANDA 5																
Imagen	Muestra 1 Media	Muestra 2 Media	Muestra 3 Media	Muestra 4 Media	Muestra 5 Media	Muestra 6 Media	Muestra 7 Media	Muestra 8 Media	Muestra 9 Media	Muestra 10 Media	Muestra 11 Media	Muestra 12 Media	Muestra 13 Media	Muestra 14 Media	Muestra 15 Media	Muestra 16 Media
1991	0,018	0,031	0,015	0,187	0,091	0,153	0,094	0,126	0,21	0,161	0,169	0,176	0,164	0,073	0,064	0,163
1996	0,011	0,005	0,011	0,203	0,087	0,198	0,107	0,202	0,189	0,16	0,218	0,244	0,186	0,08	0,08	0,222
2002	0,072	0,079	0,071	0,332	0,155	0,299	0,17	0,239	0,328	0,275	0,272	0,304	0,278	0,157	0,139	0,289
2007	0,028	0,025	0,02	0,191	0,095	0,163	0,105	0,15	0,203	0,172	0,173	0,202	0,169	0,083	0,065	0,168

6. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE LA REGRESIÓN LINEAL (MÍNIMOS CUADRADOS)



7. VALORES DE REFLECTIVIDAD NORMALIZADA POR EL AJUSTE DE REGRESIÓN LINEAL



8. MAPAS

REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA:

Andrés Felipe Granados, Jorge Iván Marín, 2007; Detección de flujo vehicular basado en visión artificial; universidad Tecnológica de Pereira; Vol. XIII, No 035 Pereira - Colombia; 163 – 168.

Ángela Andrade Pérez, Fabián Navarrete Le Blas; En: “Análisis multitemporal y generación del escenario prospectivo de cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en el Parque Nacional Llanganates” Víctor H. Bernis, Franz E. Betancourt, 2006.

Ben Maathuis, 2001; Change detection analysis; ITC – Department of Water Resources.

Bernstein, 1978; En: “Teledetección ambiental, La observación de la tierra desde el Espacio” Chuvieco, 2002.

BUSTAMANTE, R. Y A. GREZ, 1995; Consecuencias ecológicas de la fragmentación de los bosques nativos. Ciencia y ambiente, 11(2); 58 - 63.

Campbell, 1981; Cliff y Ord, 1973; En: “Teledetección ambiental, La observación de la tierra desde el Espacio” Chuvieco, 2002.

Chávez, 1975; En: “Teledetección ambiental, La observación de la tierra desde el Espacio” Chuvieco, 2002.

Christian Martínez, EcoCiencia – Marzo, 2005; Estudio multitemporal de cambios en la cobertura vegetal (1979-2004) y modelización prospectiva en la provincia de Cotopaxi; Quito - Ecuador; 9 – 19.

Cristina Rivadeneira-Roura y Andrea Coloma-Santos; Reserva Ecológica el Ángel; ECOLAP y MAE. 2007; Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador. ECOFUND, FAN, DarwinNet, IGM. Quito - Ecuador.

Dai Khorram, 1998; Townshend et al., 1992; En: "Teledetección ambiental, La observación de la tierra desde el Espacio" Chuvieco, 2002.

Darren T. Janzen, Arthur L. Fredeen, and Roger D. Wheate, 2006; Radiometric correction techniques and accuracy assessment for Landsat TM data in remote forested regions, *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 32, No. 5; 330–340.

Denise Donoso f, 2005; Uso de corredores biológicos para aumentar la conectividad en ambientes fragmentados.

ECOLAP y MAE, 2007; Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador; ECOFUND, FAN, DarwinNet, IGM; Quito- Ecuador

ECOTONO, 1996; Fragmentación y Metapoblaciones. Centro para la Biología de la Conservación. Invierno.

Emilio Chuvieco Salinero, 2002; Teledetección ambiental, La observación de la tierra desde el Espacio; 1era edición; Barcelona – España; 256 – 297.

FAO, 1995; En: "Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida "Los Petenes"" Jean-francois Mas, Jorge Correa Sandoval, 2000.

Forman R. T. & Godron, M. 1986; *Landscape Ecology*. John Wiley and Sons; New York.

Jean-francois Mas, Jorge Correa Sandoval, 2000; Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida "Los Petenes"; versión final; Campeche – México.

King, M. D, Kaufman, Y. J, Tanre, D. y Nakajima, T, 1999; Remote Sensing of Tropospheric Aerosol From Space: Past Present and Future; *Bulleting of de American Meteorological Society*; 2229 – 2259.

Lambin, E.F, 1994; Modelling Deforestation Processes. A Review. Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites (TREES). TREES Series: Research Report No. 1. Publicado por la Comisión Europea, Luxemburgo.

Lynch et al., 1992; En: "Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida "Los Petenes"" Jean-francois Mas, Jorge Correa Sandoval, 2000.

Mateu y L.A Ruiz (1999); Comparación y evaluación de métodos de normalización radiométrica relativa; Revista de teledetección; Valencia – España.

Mauricio Proaño C., M.Sc, Osvaldo Paladines., Ph., 1998; Analisis de los sistemas agropecuarios de los pequeños y medianos productores de la cuenca del río el Ángel; Carchi – Ecuador; 2- 6, 12-16.

Meyer, W.B. y B.L. Turner II, 1994; En: "Teledetección ambiental, La observación de la tierra desde el Espacio" Chuvieco, 2002.

Mikel Gurrutxaga San Vicente, 2003; Índices de fragmentación y conectividad para el indicador de biodiversidad y paisaje de la CAPV; Vasco – España; 7-13.

Primack, B. 1998; Essentials of conservation Biology; 2da edición; Massachusetts - USA; 660.

Rodin, 1998; En: "Teledetección ambiental, La observación de la tierra desde el Espacio" Chuvieco, 2002.

Santiago Ormeño Villanos (2006); Teledetección Fundamental; 3ra edición; E.U.; 50-59.

Sierra, 1999; En: "Reserva Ecológica el Ángel" ECOLAP y MAE. 2007

SIGEIN, 2003; Proyecto "Diseño y operación del Sistema de Información Ambiental, la Línea Base y el Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental para Colombia"- Anexo II Hojas Metodológicas; Santa Marta – Colombia; 10 – 12.

Sobrino, J. A. 2000; Teledetección; Servicios de Publicaciones; Universidad de Valencia – España.

Triviño Pérez A, Vicedo Maestre M y Soler Capdepón G, (2007); Análisis de sensibilidad a factores de escala y propuesta de normalización del Índice de Fragmentación de hábitats empleado por la Agencia Europea de Medio Ambiente; GeoFocus (Artículos); Alicante – España; nº 7, 148-170.

Víctor H. Bernis, Franz E. Betancourt, 2006; Análisis multitemporal y generación del escenario prospectivo de cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en el Parque Nacional Llanganates; Sangolqui – Ecuador; 8 – 40.

WEBGRAFÍA:

Carlos Troche, Edwin Guarachi; Análisis del cambio de cobertura y fragmentación del hábitad en el municipio de Independencia – Una propuesta metodológica simple para la identificación de áreas prioritarias de investigación biológica; publicación digital en: <http://www.umss.edu.bo/revistasc.php>.

Dr Manuel Arbelo, 2005; Introducción a la Teledetección; Publicado en: <http://webpages.ull.es/users/marbelo/rs.html>

GPC (Gobierno Provincial del Carchi), 2008; Datos informativos; Publicado en; http://www.carchi.gov.ec/spanish/page.php?pgid=6&sec_id=1

Steenmans, C., U. Pinborg; 2000. Publicado en: <http://europa.eu.int/comm/agriculture/publi/landscape/ch5.htm>

HOJA DE ENTREGA

Este Proyecto de Grado fue entregado a la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército.

Carlos Eduardo Ponce Villacís

Autor

Ing. Francisco León

Coordinador de Carrera

Dr. Mario Lozada

Secretario Académico

Sangolquí, ___de octubre del 2008