



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
FACULTAD POLITÉCNICA

INGENIERÍA EN INFORMÁTICA

Metodología para estimar pérdida de carbono a través de procesamiento de imágenes satelitales. Caso de uso Chaco Paraguayo

PROYECTO FINAL DE GRADO

Autor:

Santiago Smael Vera Aquino

Tutor:

Dr. Horacio Legal Ayala
MSc. José L. Vázquez Noguera

SAN LORENZO - PARAGUAY

OCTUBRE - 2015

Dedicatoria

*A mis familiares, profesores, compañeros y amigos por su apoyo,
aliento y comprensión incondicional.*

Agradecimiento

A todos los que conocen

Resumen

El cambio climático es un problema de carácter mundial, que engloba distintos factores ligadas a las actividades humanas. Los bosques constituyen un medio principal de conservación de carbono, donde la deforestación y degradación contribuyen al aumento de los Gases de efecto invernadero (GEI). En los últimos 50 años la explotación Forestal y el cambio en el uso de la tierra, produjo la pérdida del 90 % de los bosques en la región Oriental del Paraguay, generados por degradaciones y deforestaciones en los suelos con destino a una progresiva desertificación que atenta contra la biodiversidad y los sumideros de carbono. A diferencia de la región oriental, en el occidente o Chaco Paraguayo aplicar mecanismos de control ambiental implica elevados costo, por lo que el empleo de metodologías que ayuden a determinar zonas de riesgos disminuirán en cierta proporción los gasto en monitoreos.

Esta investigación elabora una metodología práctica y dinámica para identificar focos de perdidas de carbono forestal empleando procesamiento digital de imágenes satelitales. Una vez identificado focos de riesgos, permitirá fortalecer planes y estrategias en los controles, con acciones más optimas y rigurosas en base a las estimaciones hechas.

La metodología propuesta cuenta con tres procedimientos generales, donde las bandas infrarroja cercana y roja de las imágenes satelitales para dos fechas, constituyen entradas en la generación de un mapa de perdida forestal (degradación y deforestación) con su correspondiente estimación de carbono, en toneladas por hectárea, perdidos en el área evaluada. Los procedimientos son los siguientes:

- Corrección de imágenes satelitales: permite que los pixeles de las imágenes posean una correspondencia geográfica en su ubicación, como también corregir errores provenientes de los sensores remotos en el momento que la información es capturada.
- Detección de cambio Forestal: mediante análisis estadísticos previos hechos a índices de vegetación y algoritmos basados en parámetros estadísticos para la detección del cambio, nos permiten obtener una máscara de perdida forestal.

- Estimación de Perdida de cambio forestal: se hallo una correlación moderada ($r^2 = 0,509125$) entre el mapa global de carbono y el indice de vegetación, proporcionando una ecuación lineal que transforma en toneladas de carbono por hectárea el indice.

En el chaco paraguayo, específicamente parte del distrito de Filadelfia, departamento de Boquerón, fueron determinadas áreas en base a la presencia forestal (urbano, rural y húmedo), de manera a evaluar la metodología propuesta con distintos tipos de uso del suelo, sumándole un criterio de fiabilidad a la detección del cambio. Zonas rurales obtuvieron precisiones globales mayores al 85 % y coeficientes Kappa moderadas como también considerables, siendo la más satisfactorias en las pruebas experimentales. Estas pruebas fueron hechas a través de comparaciones entre resultados y estudios de perdida boscosa realizado al Paraguay, por The Global Land Cover Facility de University of Maryland Institute for Advanced Computer Studies.

La metodología propuesta nos brinda una herramienta valida en la generación de indicadores ambientales para monitoreos de áreas extensas. Estos indicadores representan alertas en áreas donde la deforestación y degradación forestal transforman los sumideros de carbono a zonas desérticas o productivas, contribuyendo así al cambio climático.

Palabras claves: Cambio climático, Gases de efecto invernadero, Sumideros de carbono, Procesamiento digital de imágenes satelitales, Sensores remotos, Precisión Global, Coeficiente kappa.

Abstract

XXXXX

Índice general

Agradecimiento	II
Resumen	III
Índice de figuras	IX
Índice de símbolos	XI
Índice de tablas	XIII
Abreviaciones	XV
1. Introducción	2
1.1. Justificación y Motivación	4
1.2. Antecedentes	5
1.3. Trabajos relacionados	5
1.4. Objetivos	12
1.4.1. Objetivo General	12
1.4.2. Objetivos Específicos	12
1.5. Organización de la Tesis	13
2. Cambio Climático	15
2.1. Ciclo de carbono	16
2.1.1. Secuestro de carbono	17
2.1.2. Pérdida de Carbono	17
2.1.3. Secuestro de carbono en Paraguay	17
2.1.4. Gran Chaco Americano	17
2.2. Biomasa	18
2.2.1. Biomasa Forestal	19
2.3. Medición de balances de carbono	19
2.4. Teledetección en el medio ambiente	20
2.5. Resumen	21
3. Procesamiento de imágenes satelitales	24
3.1. Sensores Remotos	24

3.1.1. El espectro electromagnético	25
3.1.2. Firmas espetrales	26
3.1.3. Resoluciones de un sensor	27
3.2. Imágenes satelitales	29
3.2.1. Histogramas	30
3.2.2. Combinación de bandas	31
3.3. Álgebra de mapas	32
3.4. Índices de vegetación	35
3.4.1. Índice de vegetación diferencial normalizada	35
3.4.1.1. Características del NDVI	36
3.5. Análisis Multitemporal	36
3.6. Correcciones a las imágenes satelitales	37
3.6.1. Corrección geométrica	37
3.6.1.1. Interpolación espacial	38
3.6.1.1.1. Transformación usando ecuaciones polinómicas .	38
3.6.1.1.2. Ajuste por mínimos cuadrados	39
3.6.1.1.3. Calidad de la interpolación espacial	40
3.6.1.2. Interpolación de los valores radiométricos	41
3.6.2. Corrección radiométrica	43
3.6.2.1. Pixeles o líneas perdidas	44
3.6.2.2. Bandeado	45
3.7. Proceso de detección de cambios	46
3.7.1. Normalización Radiométrica	47
3.7.2. Comparación multitemporal	48
3.7.3. Criterios de decisión	49
3.7.3.1. Discriminación de las zonas de cambio	49
3.7.4. Filtrado	50
3.8. Resumen	51
4. Materiales y Metodología	53
4.1. Materiales	53
4.1.1. Imágenes	54
4.1.1.1. Landsat	54
4.1.1.2. Campos Continuos de Vegetación (VCF)	55
4.1.1.3. Mapa global de carbono - Paraguay	56
4.1.1.4. Paraguay Forest Change Product	57
4.1.2. Aplicaciones	58
4.2. Metodología	59
4.2.1. Correcciones de imágenes satelitales	60
4.2.1.1. Corrección Geométrica	60
4.2.1.2. Corrección Radiométrica	62
4.2.2. Detección de cambio forestal	63
4.2.2.1. Detección de cambio	63
4.2.2.1.1. Comparación Multitemporal	63
4.2.2.1.2. Umbral estadístico	64
4.2.2.1.3. Iteración	64
4.2.2.2. Discriminación Forestal	67

4.2.2.2.1. NDVI	67
4.2.2.2.2. Umbral de Vegetación	67
4.2.2.2.3. Intersección área boscosa	68
4.2.2.3. Mascara de Pérdida Forestal	68
4.2.3. Estimación de pérdida de carbono forestal	70
4.3. Resumen	72
5. Pruebas experimentales	74
5.1. Caso de estudio	74
5.2. Métricas de evaluación	75
5.2.1. Porcentaje de precisión global	75
5.2.2. Coeficiente Kappa	76
5.3. Pruebas y resultados experimentales	76
5.3.1. Umbral de Vegetación	77
5.3.2. Estimación de pérdida de carbono forestal	80
5.3.3. Prueba experimental	82
5.3.4. Discusión de resultados	86
5.3.5. Dificultades encontradas	89
6. Conclusiones y trabajos futuros	92
6.1. Conclusiones	92
6.2. Trabajos futuros	94

Índice de figuras

2.1. Calentamiento Global [cal].	15
2.2. Ciclo de carbono [cic].	16
2.3. Tipos de sensores.	20
2.4. Teledetección [telb].	21
3.1. Bandas capturadas por un satélite [telb].	26
3.2. Firmas espectrales de diferentes coberturas.	27
3.3. Resolución espacial [cha].	28
3.4. Resoluciónpectral igual a 3 para el sensor SPOT y 7 en el sensor Landsat [MD05].	28
3.5. Diferentes resoluciones radiométricas en imágenes satelitales	28
3.6. Resolución temporal de 16 días [tel15].	29
3.7. Valor digital en una imagen satelital de 4 bandas ($k = 4$) y resolución radiometrica $r = 8$	29
3.8. Histograma de una imagen con niveles digitales de 0 a 255.	30
3.9. Combinación de bandas espectrales a través de los canales RGB.	32
3.10. Operadores locales condicional y lógico.	33
3.11. Áreas situadas a una distancia inferior a los valores umbrales 25,50,75,100,125.	34
3.12. Operador de área: Altitud media por áreas.	35
3.13. Firmapectral de la vegetación [ndv].	36
3.14. Localización de puntos comunes y puntos de referencia.	38
3.15. Interpolación espacial con polinomios de primer y segundo orden.	39
3.16. Error RMS de un punto de control (x, y) y su transformación (x', y')	41
3.17. Interpolación Vecino más Cercano.	42
3.18. Interpolación Bilineal.	43
3.19. Convolución cúbica.	43
3.20. Fallos del sensor en la captura de la imagen.	44
3.21. Proceso de corrección del bandeo.	46
3.22. Normalización Radiométrica.	48
4.1. Ejemplo WRS-2 Path/Row	55
4.2. Imagen VCF con diferentes tonalidades de color de acuerdo al porcentaje de vegetación.	56
4.3. Mapa Global de Carbono - Paraguay	57
4.4. Paraguay Forest Change Product	58
4.5. Diagrama de flujo. Metodología propuesta	60
4.6. Levantamiento de puntos de control.	61
4.7. Diagrama de flujo. Detección de Cambio.	63

4.8. Umbrales y valores cualitativas asignadas en cada categoría (Perdida=2, Ganancia=1, No cambio=3).	64
4.9. Mascaras de cambio, iteración de la normalización radiométrica.	65
4.10. Diagrama de flujo. Discriminación Forestal.	67
4.11. Umbral NDVI y la media en el histograma de la imagen con NDVI.	68
4.12. Diagrama de procedimientos para la obtención de la máscara de perdida forestal.	69
4.13. Presentación del resultado. Mascara de perdida Forestal y cuantificación. .	71
5.1. Mascara VCF de 0-30 % sobre NDVI año 2000	77
5.2. Puntos aleatorios dentro de la mascara VCF.	78
5.3. Puntos aleatorios.	80
5.4. Regresión Lineal. $X = NDVI, Y = TonC/ha$	81
5.5. Regresión cuadrática. $X = NDVI, Y = TonC/ha$	81
5.6. Sectores de estudio.	83
5.7. Complemento Quantum GIS.	84
5.8. Área Urbana.	85
5.9. Área Rural.	85
5.10. Área Húmeda.	86
5.11. Re-clasificación de la imagen PFCP. Perdida = 2, Otros=1	87
5.12. Coeficiente Kappa por cada Área y tolerancia.	89
5.13. GA por cada Área y tolerancia.	89

Índice de símbolos

r	Bits o Niveles radiométricos de la imagen satelital.
i	Banda de la imagen satelital.
(x, y)	Coordenadas espaciales.
f	Imagen satelital.
(x, y, i)	Coordenadas espaciales de la banda i en la imagen satelital.
k	Número de bandas que posee una imagen satelital.
$f(x, y, i)$	Nivel digital, en la posición (x, y) de la banda i , de la imagen satelital.
ND	Nivel digital de una imagen satelital.
$H(ND)$	Función discreta que determina la cantidad de apariciones de ND , en la imagen satelital.
n_{ND}	Número de pixeles en la imagen satelital teniendo el nivel digital ND .
ρ	Función que representa a una operación aritmética, lógico, entre otros.
$ndvi$	Imagen del índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI).
$ndvi(x, y)$	NDVI de las coordenadas (x, y) .
R	Posición de la banda roja en la imagen satelital.
IRc	Posición de la banda infrarroja cercana en la imagen satelital.
$T[f]$	Operador que corrige la imagen satelital f .
l	Grado del polinomio de ajuste.
(x', y')	Coordenadas de la imagen transformada.
RMS_i	Error cuadrático de la banda i .

S	Conjunto de coeficientes del polinomio.
α	Una función cualquiera.
$p_m(x)$	Polinomio con variable dependiente x .
η	Número de puntos de control.
μ	Valor de la media.
σ	Desviación típica.
i_*	Banda de la imagen satelital.
σ_i	Desviación típica de la banda i de una imagen satelital.
σ_{i_*}	Desviación típica de la banda i_* de una imagen satelital.
$f'(x, y, i)$	Imagen satelital corregida, con coordenadas espaciales (x, y) en la banda i .
I_{dif}	Indice de cambio por diferencia de imágenes.
I_{ratio}	Indice de cambio por el método de ratio.
I_c	Indice de cambio entre dos imágenes.
B	Imagen binaria en el proceso de detección de cambio.
$B(I_c)$	Nivel digital para el I_c .
U	Umbral que binariza una imagen en base a un I_c .
n	Coeficiente de fiabilidad de los datos.
Z	Variable tipificada.
μ_{I_c}	Media de la imagen de Índices de cambio.
σ_{I_c}	Desviación típica de la imagen de Índices de cambio.
$f_1^{Norm}(x, y, i)$	Imagen normalizada, de la banda i .
MC	Mascara de cambios.
σ_c	Desviación determinada como constante para la umbralización de la cobertura vegetal.
r^2	Coeficiente de determinación.
$C(x, y)$	Toneladas de carbono por hectárea en las coordenadas (x, y) .

$Ic(x, y)$ Indice de cambio en las coordenadas (x, y) .

$PC(x, y)$ Toneladas de carbono por hectárea perdidos en las coordenadas (x, y) .

VT Puntos de verdad terreno.

T Puntos catalogados correctamente.

F Puntos catalogados incorrectamente.

TP Verdadero positivo.

FP Falso positivo.

P Total positivo.

N Total negativo.

FN Falso negativo.

P' Total positivo catalogado.

N' Total negativo catalogado.

Índice de tablas

1.1.	Resumen de trabajos relacionados.	12
2.1.	Problemática que afrontan los países del gran chaco americano [Dua12]. .	18
4.1.	Resoluciones de los satélites Landsat.	54
4.2.	Representación del valor digital en la imagen PFCP.	58
4.3.	Rangos del coeficiente de determinación.	70
5.1.	Matriz de Confusión	75
5.2.	Valoración del coeficiente kappa[LK77].	76
5.3.	Media y desviación del muestreo realizado.	79
5.4.	Polígono de las áreas. Sistema de coordenadas UTM Zona 20 K.	83
5.5.	RMSE obtenido del meta-dato de cada imagen obtenida.	84
5.6.	Coeficiente Kappa y precisión Global obtenidos.	88

Abreviaciones

GEI	<i>Gases de Efecto Invernadero.</i>
CO2	<i>Dióxido de carbono.</i>
C	<i>Carbono.</i>
SIG	<i>Sistemas de Información Geográficas.</i>
REDD+	<i>Reducción de GEI por la Deforestación y Degrado de bosques.</i>
RMSE	<i>Error cuadrático medio.</i>
ParLu	<i>Paraguay Land Use.</i>
WWF	<i>World Wildlife Fund.</i>
ENPAB	<i>Estrategia nacional y plan de acción para la conservación de la Biodiversidad.</i>
VD	<i>Valor Digital.</i>
FMAM	<i>Fondo para el Medio Ambiente Mundial.</i>
PDD	<i>Programa de Pequeñas Donaciones.</i>
LiDAR	<i>Detección área de luz y medidas de rango.</i>
NDVI	<i>Índice de vegetación diferencial normalizada.</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator.</i>
RMS	<i>Root Mean Squared Error.</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration.</i>
MSS	<i>Multi-spectral Scanner.</i>
TM	<i>Thematic Mapper.</i>
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus.</i>
OLI	<i>Operational Land Imager.</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor.</i>
VCF	<i>Vegetation Continuous Fields.</i>
MODIS	<i>MOderate-resolution Imaging Spectroradiometer.</i>
PFCP	<i>Paraguay Forest Change Product.</i>

USGS	<i>United States Geological Survey.</i>
L1T	<i>Level 1 Terrain Corrected.</i>
GPL	<i>General Public License.</i>
GA	<i>Global Acurrancy.</i>
WRS-2	<i>Landsat Worldwide Reference System-2.</i>
PFCP	<i>Forest Change Produc.</i>
Km	<i>Kilómetros.</i>
Has	<i>Hectáreas.</i>
GCP	<i>Global Control Points .</i>

Capítulo 1

Introducción

La captura de carbono es un servicio ambiental proporcionado por los bosques para mitigar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera [Oje13]. La captura de carbono es determinante para disminuir el calentamiento global y estabilizar el cambio climático producidos por el incremento en la atmósfera de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI) [MD]. El CO₂ es el gas mas abundante, contribuyendo con un 76 % al GEI [ÁJB⁺01], debido principalmente al cambio de paisajes de bosques tropicales maduros a paisajes agrícolas.

Los bosques tropicales en condiciones naturales contienen más carbono aéreo por unidad de superficie que cualquier otro tipo de cobertura terrestre [GBNF07]. Por esto, cuando los bosques se convierten a otros usos del suelo, ocurre una gran liberación neta de carbono a la atmósfera. El cambio en el uso del suelo es responsable del 15-20 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero [Oje13].

Las transformaciones química de compuestos, que contienen carbono en los intercambios entre biosfera, atmósfera, hidrosfera y litosfera son conocidas como ciclo de carbono [Wik15]. La fotosíntesis de las plantas constituye un proceso fundamental en el ciclo, ya que permite separar el CO₂ en oxígeno que consumimos y carbono (C) en materia orgánica, actuando en forma de almacenes de C como biomasa en función a la composición florística, la edad y la densidad de cada estrato por comunidad vegetal por períodos prolongados [AMVMEB⁺03].

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía. La biomasa forestal se define como la cantidad total de materia orgánica aérea presente en los árboles incluyendo hojas, ramas, tronco principal y corteza [GS03].

La teledetección o percepción remota sin estar en un contacto físico directo permite el uso de informaciones provenientes de sensores instalados en plataformas espaciales, que complementados con sistemas de información geográficas (SIG) permiten análisis mas continuos y dinámico. Estos sensores remotos captan la energía reflejada o radiada por la superficie, ya sea emitida por el sol (sensores pasivos) o por el mismo sensor (sensores activos), para ser transformadas a valores digitales (VD) como imágenes satelitales, de manera secuencial para cada espacio de la tierra, a intervalos regulares de tiempo.

Las coberturas vegetales, a través de la imágenes proveídas por los sensores remotos, es posible calcular índices que varían dentro de márgenes, indicando el vigor de la vegetación o la densidad de la biomasa forestal. Estos indices junto con la comparación multitemporal hace posible identificar la evolución de coberturas vegetales en periodos de tiempos obteniendo resultados cualitativos y/o cuantitativos en espacio y tiempo [MG13].

En la actualidad existen diferentes métodos para la detección de cambios de vegetación. Los métodos requieren una supervisión, un trabajo de campo y la utilización de complejos sistemas de información geográfica. Estos sistemas de información geográfica son comúnmente software de pago, elevando de esta manera el costo de dichos estudios.

La falta de información nos lleva a varios cuestionamientos referente a como estamos manejando nuestro medio ambiente y que efectos acarreara esos usos. El empleo de la teledetección y las imágenes satelitales multitemporales permiten realizar un análisis a lo largo del tiempo de los cambios que el ambiente está experimentando, mas aun en zonas como el Chaco Paraguayo, donde la información ambiental es escaso por los altos costos y dificultades en el acceso al realizar controles en el terreno.

Se propone diseñar e implementar una metodología automática que permita estimar la

perdida de carbono a través de la biomasa, empleando procesamiento digital de imágenes satelitales, disponibles de forma libre, dinámicos y no complejos.

1.1. Justificación y Motivación

REDD+ es una iniciativa que tiene como objetivo reducir la pérdida de bosques, teniendo como actividades principales [Oje13]:

- Evitar pérdidas como emisiones de gases de efecto invernadero (conservación, no deforestación, no degradación).
- Mantener el depósito o stock de carbono (conservación, gestión sostenible).
- Incrementar el depósito por su efecto de retención o sumidero de carbono (conservación, restauración, gestión sostenible).

El Paraguay se ha embarcado en el proceso de preparación para reducir la deforestación y degradación forestal, a fin de disminuir las emisiones de CO₂, conservar los bosques y su biodiversidad. Este proceso deriva la necesidad de elaborar una estrategia nacional, con políticas socio ambientales y económicas viables.

Para medir los beneficios de carbono de un proyecto REDD+ es necesario calcular la cantidad de carbono almacenado en el bosque en cuestión y luego predecir la cantidad de carbono que se podría conservar si se detiene o reduce la deforestación y la degradación forestal [Nel].

Las grandes extensiones de las áreas de estudio, la dificultad de acceder a las mismas, el alto costo del establecimiento de las parcelas de inventario y su limitada utilidad hacen que la mayoría de las investigaciones para estimar y mapear la biomasa en bosques se centren en las técnicas de Sensores Remotos.

La necesidad de crear metodologías que ayuden al monitoreo de forma dinámica y barata, lleva al desarrollo de herramientas libres que permitan estimar focos de alerta para la toma de acciones y controles más rigurosos a tiempo.

1.2. Antecedentes

Paraguay es un país que basa su economía en la agricultura y la ganadería extensiva, actividades que han afectado al recurso forestal, dando como resultado extensas áreas deforestadas y degradadas [Par].

En el informe realizado por la ENPAB [BdFM03] se menciona que existe una fuerte presión política y social, proveniente de diversos grupos que buscan transformar las tierras del Chaco paraguayo en unidades económicas de producción, cuyo enfoque gira en torno al crecimiento económico antes que al desarrollo sostenible. En muchas zonas del chaco paraguayo, el modelo de desarrollo y uso de la tierra ha producido grandes extensiones de tierras altamente degradadas, arenales, desertificación y salinización.

A pesar que existen leyes de protección para evitar la deforestación y valorar los bosques, los mismos necesitan apoyo para su monitoreo y aplicación efectiva, debido a que los costos en tiempo y recursos son elevados.

Con el objetivo de implementar políticas de mitigación del cambio climático relativas a reducir las emisiones provenientes de la degradación y la deforestación (REDD+), los países en desarrollo deben contar con estimaciones robustas sólidas en cuanto a las reservas de carbono forestal [Par].

1.3. Trabajos relacionados

El proyecto del Mapa global de carbono fue desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology en el año 2011 [SHB⁺¹¹], abarcando más de 2.5 millones en hectáreas de bosques, para tres continentes, trazando el stock total de carbono en la biomasa viva (por debajo y por encima). La incertidumbre media en las estimaciones realizadas para todos los continentes fue de $\pm 30\%$.

En el marco denominado *Desarrollo del estudio de linea de base para el sitio piloto Bosque atlántico de Alto Paraná. (BAAPA)* [Par], fue confeccionado un mapa de carbono en base al análisis de regresión entre el índice de vegetación diferencial normalizada

(NDVI) y toneladas de carbono por hectárea. El coeficiente de determinación hallado fue $r^2 = 0,64$.

Vanessa Almando Duré [Dur14a] estima el carbono almacenado en el Parque Nacional Defensores del chaco según formación vegetal a través de imágenes satelitales . La metodología utilizada corresponde a un análisis de regresión entre el NDVI y toneladas de carbono por hectárea. La investigación evaluó tres tipos de comunidades vegetales obteniendo coeficientes de determinación similares a $r_1^2 = 0,8$, $r_2^2 = 0,7$, $r_3^2 = 0,8$.

Gustavo Miguel Huespe Duarte [Dua12] detecta el cambios en la cobertura vegetal mediante indices de vegetación (NDVI), dentro y fuera de la reserva de la biosfera del Chaco en el periodo 1985-2011.

Tyukavina et al. [TBH⁺15] estima la pérdida de carbono sobre el suelo en los bosques tropicales naturales y gestionados para los años 2000-2012. La estimación fue hecha en todos los continentes, donde la incertidumbre en los resultados de América Latina fueron de $\pm 8\%$.

Maxime Réjou-Méchain et al. [RMTB⁺15] utiliza un modelo repetido para inferir variaciones espaciales y temporales de un bosque neotropical con alta biomasa mediante la adquisición del small-footprint LiDAR. El modelo presenta un error cuadrático medio (RMS) del 14% para resoluciones de 1 hectárea y de 23% para una resolución de 0,25 hectáreas en las variaciones de biomasa.

Jean Pierre Ometto et al. [OAA⁺15] realiza un mapa densidad de biomasa forestal en el Amazonas. El método estima las variaciones espaciales de la biomasa utilizando el análisis de imágenes satelitales. El modelo presenta valores de incertidumbres en su estimación para el periodo 1990-1999 del $\pm 15\%$ y 2000-2009 del $\pm 14\%$.

Michael W. Palace et al. [PSD⁺15] realiza estimaciones de la estructura de un bosque tropical mediante mediciones de campo, un modelo sintético y discreto a partir de datos retornados por un sensor lidar. En estimaciones de campo realizadas para alturas dosel se obtuvo un $r^2 = 0,17$. El modelo sintético desarrollado estima muchas propiedades estructurales de los bosque, tales como, medida de diámetro del tronco con $r^2 = 0,51$

y densidad de árboles con $r^2 = 0,43$.

Nancy L. Harris et al. [HBH⁺12] desarrolla un mapa de referencia para las emisiones de carbono producidas por deforestaciones en bosques tropicales. El mapa presenta un intervalo de predicción de 0,57 a 1,22 petagramos de carbono por año (Pg C year^{-1}) .

Un estudio realizado por University of Maryland Institute for Advanced Computer Studies denominado Forest Cover Change in Paraguay, nos muestra el cambio de vegetación estimado en todo el país entre los años 1990 y 2000 [HKS⁺09]. Los resultados para todas las escenas (Fotografías áreas y satelitales) obtuvieron precisiones globales mayor al 90 % y errores por comisión y omisión menores al 10 %.

Xiao-Peng Song et al. [SHS⁺14] realiza una detección anual de cobertura vegetal perdido, utilizando imágenes satelitales multitemporales que contienen porcentaje de cobertura vegetal. El método empleado encuentra una relación entre imágenes satelitales de Vegetation Continuous Fields (VCF) y muestras de datos correspondientes a vegetación en imágenes satelitales Landsat. Los coeficientes de determinación van de 0,7 a 0,9 en los porcentajes de vegetación.

Clovis Grinand et al. [GRG⁺13] estima la deforestación en los bosques húmedos y secos tropicales de Madagascar desde 2000 hasta 2010. La estimación es hecha utilizando imágenes satelitales Landsat multitemporales y la clasificación de bosques al azar. Los resultados obtiene un error de comisión del 85 % para coberturas estables y 61 % para coberturas con cambios.

Matthew L. Clark et al. [CAGR10] propone un enfoque escalable para cartografiar anualmente la cubierta terrestre a 250 m utilizando datos MODIS de series de tiempo utilizando como caso de estudio la ecorregión chaco seco de América del Sur. El enfoque presenta una precisión global del 79 % en la clasificación de tipos de coberturas.

Dolors Armenteras et al. [ACRR13] calcula determinantes nacionales y regionales de la deforestación tropical en Colombia. El estudio presenta los coeficientes de determinación para cada región del país y nacionalmente en base a la deforestación y los diferentes tipos de usos del suelo.

Gu et. al [GW15] realiza un estudio para reducir la escala de 250 m que poseen las imágenes satelitales MODIS NDVI, sobre imágenes satelitales multitemporales Landsat utilizando enfoques de minerías de datos. La temporada de evaluación fue la etapa de crecimiento vegetal. El coeficiente de determinación hallado a partir del MODIS NDVI y el calculado a través de imágenes landsat fue de $r^2 = 0,97$.

En la siguiente tabla 1.1 se presenta un resumen de los trabajos relacionados.

Año	Autores	Trabajo	Evaluaciones
2011	Saatchi et al.	Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents	Incertidumbre media en las estimaciones del 30 %
2013	ParLu, WWF Paraguay y la Facultad de Ciencias Agrarias	Desarrollo del estudio de linea de base para el sitio piloto Bosque atlántico de Alto Paraná. (BAA-PA)	Coeficiente de determinación entre el NDVI y carbono $r^2=0,64$
2014	Vanessa Almando Duré	Estimación de carbono almacenado en el Parque Nacional Defensores del Chaco según formación vegetal mediante imágenes satelitales, año 2014	Coeficientes de determinación $r_1^2 = 0,8$, $r_2^2 = 0,7$, $r_3^2 = 0,8$
			Continua...

2012	Gustavo Miguel Huespe Duarte	Detección de cambios de la cobertura vegetal mediante indices de vegetación (NDVI), dentro y fuera de la Reserva de la biosfera del Chaco en el periodo 1985-2011	Presenta conclusiones acerca del cambio detectado en diferentes regiones del caso de estudio.
2015	Tyukavina et al.	Aboveground carbon loss in natural and managed tropical forests from 2000 to 2012	Incertidumbre en los valores estimados de $\pm 8\%$
2015	Réjou-Méchain et al.	Using repeated small-footprint LiDAR acquisitions to infer spatial and temporal variations of a high-biomass Neotropical forest	RMS 14% y 23% en las pruebas.
2015	Jean Pierre Ometto et al.	Amazon forest biomass density maps: tackling the uncertainty in carbon emission estimates	Incertidumbre en los valores estimados de $\pm 15\%$ y $\pm 14\%$
Continua...			

2015	Michael W. Palace et al.	Estimating forest structure in a tropical forest using field measurements, a synthetic model and discrete return lidar data	Coeficientes de determinación $r^2 = 0,17$, $r^2 = 0,51$, $r^2 = 0,43$
2012	Nancy L. Harris et al.	Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions	Intervalo de predicción entre 0,57 a 1,22 (Pg C year ⁻¹)
2009	Huang et al.	Assessment of Paraguay's forest cover change using Landsat observations	Presiciones globales mayores al 90 % y errores por comisión menores al 10 %
2014	Xiao-Peng Song et al.	Annual detection of forest cover loss using time series satellite measurements of percent tree cover	Coeficientes de determinación entre 0,7 – 0,9
Continua...			

2013	Clovis Grinand et al.	Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier	Error de comisión del 85 % para coberturas estables y 61 % para coberturas con cambios.
2010	Matthew L. Clark et al.	A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America	Presición global del 79 %
2013	Dolors Armenteras et al.	National and regional determinants of tropical deforestation in Colombia	Coeficientes de determinaciones por regiones del país.
Continua...			

2015	Gu et al.	Downscaling 250-m MODIS Growing Season NDVI Based on Multiple-Date Landsat Images and Data Mining Approaches	Coeficiente de de- terminación $r^2 =$ 0,97
------	-----------	---	---

TABLA 1.1: Resumen de trabajos relacionados.

En esta sección pudimos observar que existen diferentes trabajos relacionados a la estimación de carbono y detección de cambio forestal, tanto a nivel nacional e internacional. Este trabajo pretende diseñar una metodología, interceptando los dos tópicos mencionados, que estime perdidas de carbono forestal de manera dinámica. Aquellos procedimientos que agilizan la estimaciones ahorrando visitas al terreno y supervisiones humanas en los mismos son los que determinan el dinamismo.

1.4. Objetivos

Atendiendo a la necesidad de metodologías alternativas para el monitoreo de perdida de carbono en el campo ambiental, los objetivos delineados son los siguientes.

1.4.1. Objetivo General

- Desarrollar una metodología automática de análisis de imágenes satelitales multi-temporales para la generación de indicadores respecto a la perdida del contenido de carbono en zonas del Chaco Paraguayo.

1.4.2. Objetivos Específicos

Para el logro del objetivo general los siguientes objetivos específicos son propuestos:

- Realizar detecciones de cambio automatizada dentro del área de estudio a través de la Teledetección y un SIG.
- Desarrollar normalizaciones de imágenes para la comparación multi-temporal.
- Determinar una constante para la clasificación de vegetación en imágenes satelitales.
- Determinar la relación entre la biomasa forestal y el carbono a través de muestreos.

1.5. Organización de la Tesis

La distribución de capítulos del presente trabajo final de grado se encuentra organizado de la siguiente forma:

- En el capítulo 2 se describen los conceptos generales relacionados al cambio climático y perdida de carbono.
- En el capítulo 3 se pretende dar un marco teórico acerca del procesamiento digital de imágenes satelitales.
- En el capítulo 4 se detalla los algoritmos y procedimientos empleados en la metodología de estimación de perdida de carbono.
- En el capítulo 5 se presenta las métricas para medir la calidad de los resultados. También se evaluá los resultados en base a las métricas previstas.
- En el capítulo 6 se presentan las conclusiones finales tras los experimentos y análisis de resultados del proyecto, concluyendo con propuestas de trabajos futuros para dar continuidad al trabajo final de grado.

Capítulo 2

Cambio Climático

El cambio climático es definido como cualquier variación del clima a lo largo del tiempo, ya sea por variabilidad natural o como resultado de las actividades humanas que altera la composición de la atmósfera y que se suma a la variabilidad climática natural observada en periodos de tiempos comparables [Rob02].

En la Figura 2.1 podemos observar como el planeta tierra esta cubierta por una capa de gases que deja penetrar energía solar que calienta la superficie terrestre. Algunos de los gases en la atmósfera, llamados gases de efecto invernadero (GEI), impiden el escape de este calor hacia el espacio . El escape de calor mantiene a la tierra a una temperatura promedio arriba del punto de congelación del agua y permite la vida. A pesar de esto, las actividades humanas están produciendo un exceso de gases que están potencialmente calentando el clima de la tierra [Dur14b].

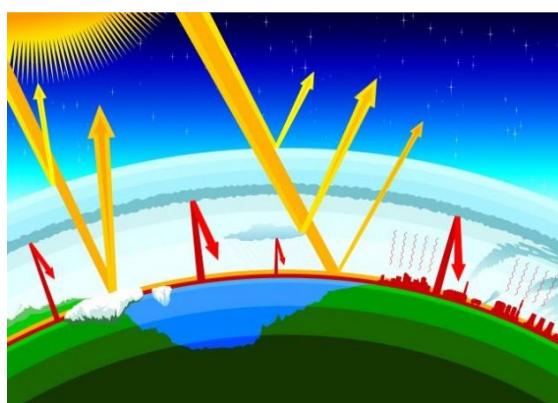


FIGURA 2.1: Calentamiento Global [cal].

2.1. Ciclo de carbono

Las plantas absorben el dióxido de carbono existente en el aire o el agua, acumulándolos en los tejidos vegetales en forma de materia orgánica, mediante la fotosíntesis [nat15]. Posteriormente, los animales herbívoros se alimentan de estos vegetales para transferir esa energía a los demás niveles (carnívoros que se alimentan de los herbívoros). La energía transferida sigue varios caminos: por un lado es devuelto a la atmósfera como dióxido de carbono mediante la respiración; por otro lado se deriva hacia el medio acuático, donde puede quedar como sedimentos orgánicos, o combinarse con las aguas para producir carbonatos y bicarbonatos (suponen el 71 % de los recursos de carbono de la Tierra). La acumulación de carbono en zonas húmedas genera turba (carbón ligero y esponjoso), resultado de una descomposición incompleta, lo que da lugar a la formación de depósitos de combustibles fósiles como petróleo, carbón y gas natural.

El ciclo del carbono queda completado gracias a los organismos descomponedores, los cuales llevan a cabo el proceso de mineralizar y descomponer los restos orgánicos, cadáveres, excrementos, entre otros. Además de la actividad que llevan a cabo el reino vegetal y animal en el ciclo, también liberan carbono la putrefacción y la combustión [nat15]. La Figura 2.2 nos presenta el ciclo completo del carbono.

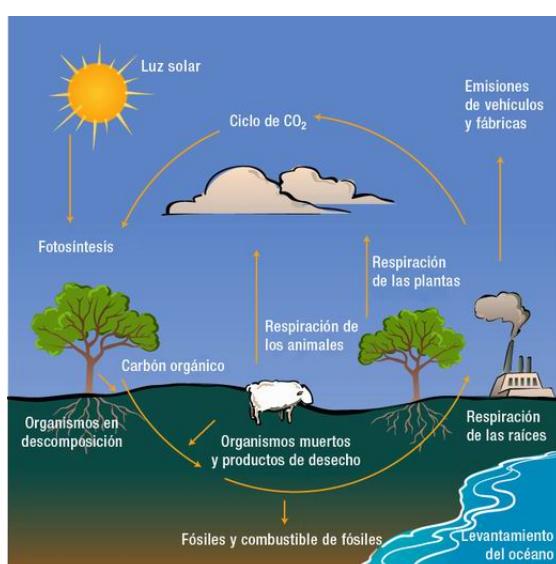


FIGURA 2.2: Ciclo de carbono [cic].

2.1.1. Secuestro de carbono

El CO₂ y otros gases invernaderos actúan atrapando la energía calórica (radiación solar de onda corta) reflejada de la superficie de la tierra y las nubes [Esp]. Este calor retenido puede conducir al calentamiento global en el planeta. Los niveles del dióxido de carbono atmosférico pueden reducirse en la misma medida que los niveles de carbono orgánico del suelo aumentan a través del secuestro de carbono. Si el carbono orgánico del suelo no es alterado, puede permanecer en el suelo por muchos años como materia orgánica estable. Este carbono es entonces secuestrado o removido de la atmósfera para ser reciclado. De esta forma se pueden reducir los niveles de CO₂, disminuyendo las probabilidades de calentamiento global [Cas03].

2.1.2. Pérdida de Carbono

Pérdida de carbono se refiere a aquella porción de carbono que no pudo ser almacenada o capturada en el intercambio normal que ocurre entre la superficie terrestre y la atmósfera en el ciclo de carbono [MD], contribuyendo al calentamiento global mediante la emisión de dióxido de carbono que compone el grupo de gases de efectos invernaderos.

2.1.3. Secuestro de carbono en Paraguay

El Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) y el Programa de Pequeñas Donaciones (PDD), en nuestro país, nos dice que el uso de hidrocarburos para generar energía eléctrica, el uso de biomasa como fuente de energía, las emisiones industriales, la deforestación, los incendios forestal, la actividad pecuaria, el manejo y disposición de residuos y la actividad del transporte son los que presentan mayores emisiones de carbono [Piz10], en consecuencia contribuyen al cambio climático.

2.1.4. Gran Chaco Americano

En el territorio del Gran Chaco Americano, se detecta una tendencia de importante aumento de las tasas de deforestación diaria por encima de las 1.400 hectáreas, siendo el promedio del período 15 de junio al 10 de julio de 2.011, de 1.042 hectáreas por día, y del período 10 de julio al 13 de agosto de 2.011 de 1.408 hectáreas por día en toda la

región, dando un total de 47.856 hectáreas de áreas boscosas que registraron cambio a uso agropecuario, en 34 días. Entre los países que componen el Gran Chaco Americano, Paraguay registró el mayor porcentaje de la deforestación (86 %), seguido por Argentina (13 %) y Bolivia (1 %). En Brasil, no se detectaron caso de deforestación para la región. En el caso específico de Paraguay, la tasa de deforestación diaria ha aumentado, pasando de 998 hectáreas por día a 1.210 hectáreas por día [fao03], perdiéndose por consiguiente en gran medida sumideros de carbono, lo cual va aportando al desequilibrio del ciclo. En la Tabla 2.1 podemos observar los principales problemas ambientales que afronta el Gran Chaco Americano, en cada país que lo compone.

TABLA 2.1: Problemática que afrontan los países del gran chaco americano [Dua12].

Argentina	Bolivia	Paraguay
Deforestación de los bosques nativos.	Deforestación de los bosques nativos.	Deforestación de los bosques nativos.
Excesiva dependencia de la producción ganadera y explotación forestal.	Sobrepastoreo.	Sobrepastoreo.
Sobrepastoreo.	Incendios de bosques y pastizales.	Incendios de bosques y pastizales.
Incendios de bosques y pastizales.	Pérdida de biodiversidad.	Manejo no sustentable de los recursos hídricos.
Perdida de labiodiversidad.	Cambio climático.	Pérdida de biodiversidad.
Cambio climático.		Cambio climático.

2.2. Biomasa

La biomasa es aquel material orgánico biodegradable y no fosilizado originado de plantas, animales y microorganismos; incluye productos, subproductos, residuos y desechos de la agricultura, forestería e industrias afines, así como las fracciones orgánicas y no fosilizadas de los desechos industriales y municipales. La biomasa también incluye los gases y líquidos recuperados de la descomposición de materiales orgánicos biodegradables y no fosilizados [SH08]. La biomasa es considerada como la masa total de organismos vivos en una zona o volumen determinado (a menudo también se incluyen los restos de plan que han muerto recientemente). La cantidad de biomasa se expresa mediante su peso en seco o su contenido de energía de carbono o de nitrógeno [GMKM⁺⁸⁷].

2.2.1. Biomasa Forestal

La biomasa forestal se define como el peso (o estimación equivalente) de materia orgánica que se encuentra en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo [SGG00], normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso verde o seco. La biomasa forestal es frecuentemente separada en componentes, donde los más típicos corresponden a la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta.

En términos de pérdida y secuestro, representa la cantidad potencial de carbono que puede ser liberada a la atmósfera, debida a la deforestación, o la conservada en superficies terrestres cuando los bosques son correctamente gestionados [LB05].

2.3. Medición de balances de carbono

La dinámica del balance de carbono en un ecosistema forestal es muy compleja de medir, ya que es necesario determinar la captura de carbono por crecimiento de biomasa en los árboles y otros componentes en la vegetación como las pérdidas ocasionadas por disturbios, sean naturales o por actividades humanas; descomposición de madera muerta; y la transferencia entre los compartimentos vivos, muertos y el suelo [A⁺08].

Existen metodologías que permiten medir y monitorear cambios en reservorios promedios de carbono por unidad de área. A continuación se citan algunos de ellos:

- **Inventarios forestales:** se establecen relaciones alométricas con mediciones de terreno en función al diámetro o volumen de árboles con las reservas de carbono forestal. La desventaja que presenta es su lentitud al realizar en áreas grandes y costo elevado que presenta [AKB⁺05]. Definiendo alometría como los cambios de dimensión relativa de las partes corporales correlacionados con los cambios en el tamaño total.
- **Sensores remotos:** existen diferentes tipos de sensores que permiten monitorear cambios en reservorios de carbono vegetal con mayor dinamismo y a gran escala [Tsu12]. Podemos citar:

1. **Sensores remotos ópticos (pasivos):** capturan luz solar o artificial reflejada desde el objeto, detectando la intensidad de luz visible e infrarroja en una o mas longitudes de ondas.
2. **Sensores remotos activos:** este sensor se encuentra montado en un satélite, el cual emite pulsos de microondas oblicuamente detectando y registrando la intensidad, fase y tiempo de los impulsos reflejados desde la superficie terrestre.
3. **Sensores remotos láser como LiDAR (detección área de luz y medidas de rango):** mide la distancia entre el sensor y el objeto usando el tiempo que tarda el pulso en viajar y la intensidad del pulso reflejado del objeto.

La Figura 2.3 nos muestra como la información es capturada, por medio de los 3 tipos de sensores descriptos.

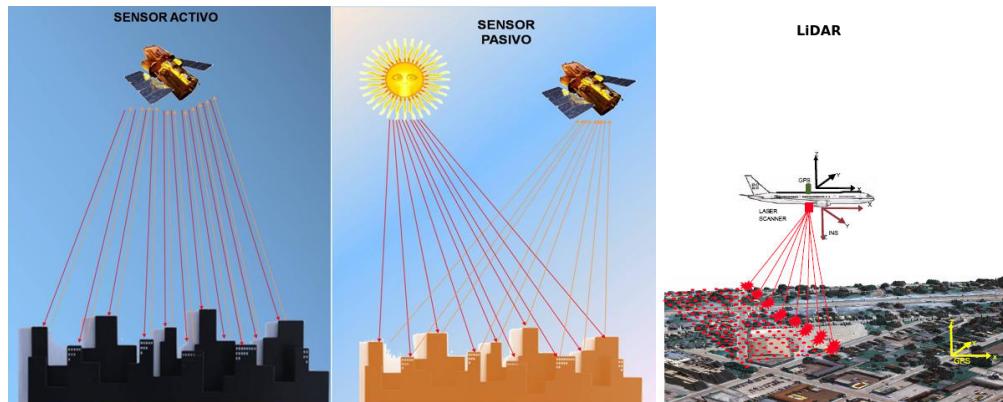


FIGURA 2.3: Tipos de sensores.

2.4. Teledetección en el medio ambiente

El término teledetección esta definida como la ciencia y arte de obtener información referente a la superficie terrestre sin entrar en contacto con ella. Esto se realiza detectando y grabando la energía emitida o reflejada para su procesamiento, análisis y aplicación de esa información [Sal02].

En los últimos años se han desarrollado bastantes aplicaciones en casi todas las áreas que involucra la tierra, debido a las grandes posibilidades y ventajas que presenta con la localización de espacios geográficos, observación de fenómenos temporales e integración

de resultados a los sistemas de información geográfica, reduciendo los costos en dinero y tiempo empleados en estudios sobre el terreno [BLMP06]. La aplicación de la teledetección en los recursos naturales se fundamenta en que los elementos del mismo tienen un respuesta espectral propia a los sensores remotos. Por ello, la teledetección espacial es empleada como complemento y no como sustituto a estudios ambientales por permitir realizarlos a escalas espaciales y temporales distintas a las que se acceden desde experimentos controlados, lo cuales son también necesarios e imprescindibles pero a veces insuficientes [PO11].

En la Figura 2.4 podemos observar el proceso completo de la teledetección. El sensor remoto montado en el satélite captura la información terrestre por medio de la energía solar. En una estación de recepción, la información capturada es transformada a imágenes para poder ser procesadas por el hombre en algún tipo de análisis.

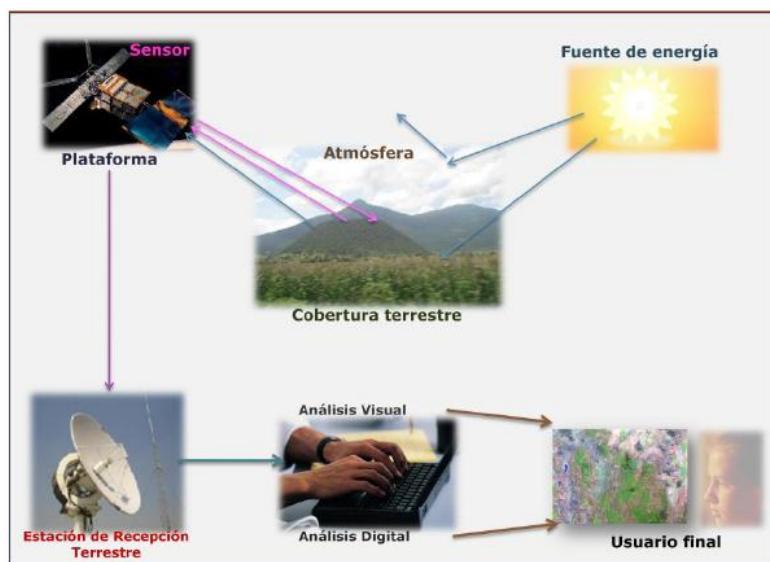


FIGURA 2.4: Teledetección [telb].

2.5. Resumen

La perdida de los bosques provocan daños con consecuencias exponenciales al medio ambiente, ya que representan un factor fundamental en la estabilidad climática de la tierra. Las tierra esta cubierta por gases que dejan penetrar la energía solar, manteniendo temperaturas optimas para la vida. Algunos de los gases impiden el escape del calor hacia el espacio, a estos gases se los llaman gases de Efecto Invernadero (GEI). Las actividades

humanas producen en exceso los GEI, principalmente con dióxido de carbono (CO₂) a través de la deforestación y degradación en los bosques. La fotosíntesis compone un elemento fundamental en el proceso natural denominado ciclo del carbono, mitigando el CO₂ de la atmósfera con transformaciones del gas a materia orgánica en las plantas (biomasa), a esto se lo conoce como secuestro de carbono. El chaco paraguayo presenta una tendencia importante en el aumento de las tasas de deforestación, siendo entre los países que componen el Gran chaco americano el que presenta mayor porcentaje (86 %). En el 2011, el chaco paraguayo registro un promedio diario de 1402 hectáreas de bosques deforestados a causa de actividades humanas ligadas a la agricultura, silvicultura y ganadería, por ello la medición del balance de carbono en nuestro país resulta importante para controles del manejo del medio ambiente. Los inventarios forestales establecen relaciones entre reservas de carbono forestal y variables alométricas de los árboles para medir el contenido de carbono, presentando como principal dificultad la lentitud en el estudio de áreas extensas. En cambio, el empleo de procesamiento digital de imágenes satelitales junto con la teledetección nos brindan un dinamismo en el monitoreo a gran escala.

Capítulo 3

Procesamiento de imágenes satelitales

La teledetección presenta un principio base similar al de la visión, permitiendo mediante una fuente de energía, un objetivo o escena y un sensor, generar imágenes digitales que posibilitan resaltar aquellos elementos difíciles de percibir o ser distinguidos directamente a través de una imagen normal. El comportamiento característico que poseen los recursos naturales a sensores remotos, nos posibilita el empleo amplio de técnicas de procesamiento de imágenes provechosos para el logro de los objetivos en la investigación [DN].

Este capítulo consiste en brindar conceptos específicos utilizados por la metodología, posibilitando comprender la influencia de cada factor en el empleo de imágenes satelitales para la estimación de pérdida del contenido de carbono forestal.

3.1. Sensores Remotos

Los sensores remotos nos permiten obtener información de la superficie terrestre, soportados en diferentes plataformas (terrestre, aérea y satélite), mediante la captura de energías reflejadas o radiadas proveniente del sol (sensores pasivos) o del mismo sensor

(sensores activos) [Dua12]. La energía capturada es transformada en productos, con diversos y diferentes especificaciones, siendo las fotografiás áreas e imágenes de satélites las más conocidos.

3.1.1. El espectro electromagnético

Las longitudes de ondas son continuas, pero de igual modo se establecen un serie de bandas donde las radiaciones manifiestan un comportamiento similar, organizandolas de este modo en un espectro electromagnético [Ali10]. Las bandas más empleadas son las siguientes [Sal02]:

- **Espectro visible:** (400 nm a 700 nm) se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta se distinguen tres bandas fundamentales: Azul (400 nm a 500 nm), verde (500 nm a 600 nm) y rojo (600 nm a 700 nm).
- **Infrarrojo próximo:** (700 nm a 1300 nm) se utiliza para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- **Infrarrojo medio:** (1,3 um a 8 um) en esta franja se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. El infrarrojo medio es muy utilizado para estimar el contenido de humedad en la vegetación y los focos de alta temperatura.
- **Infrarrojo lejano o térmico:** (8 um a 14 um) se detecta el calor de la mayoría de las cubiertas terrestres.
- **Microondas:** (a partir de 1 um) de gran interés por ser un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa.

En la Figura 3.1 podemos observar como el sensor montado en una plataforma espacial capta la información terrestre en diferentes bandas de acuerdo a la longitud de onda.

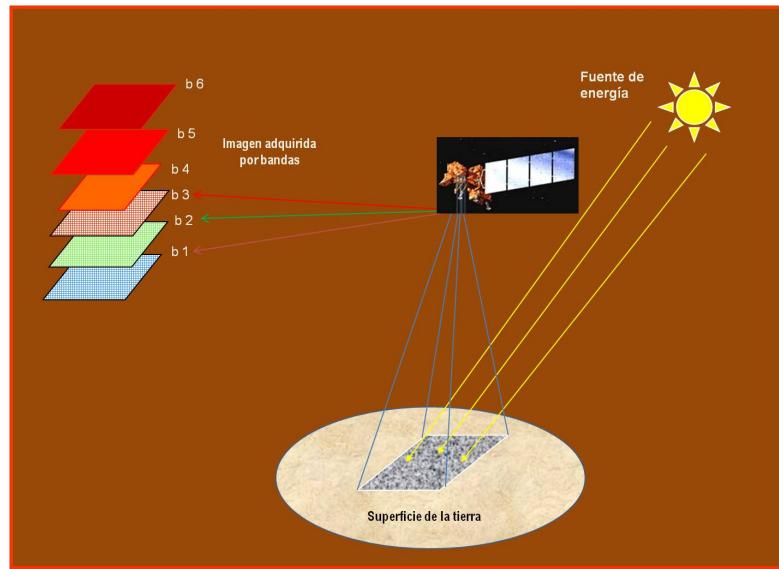


FIGURA 3.1: Bandas capturadas por un satélite [telb].

3.1.2. Firmas espectrales

Las firmas espectrales consisten en la representación de energía reflejada con relación a las longitudes de ondas, consideradas sin el efecto atmosférico y medida en condiciones ideales del ángulo incidente. Las firmas espectrales ayudan a identificar los objetos en la superficie terrestre debido a que cada uno presenta una respuestapectral única [SRHS04].

En la Figura 3.2 se observa como cada objeto difiere de los demás en sus firmas espectrales.

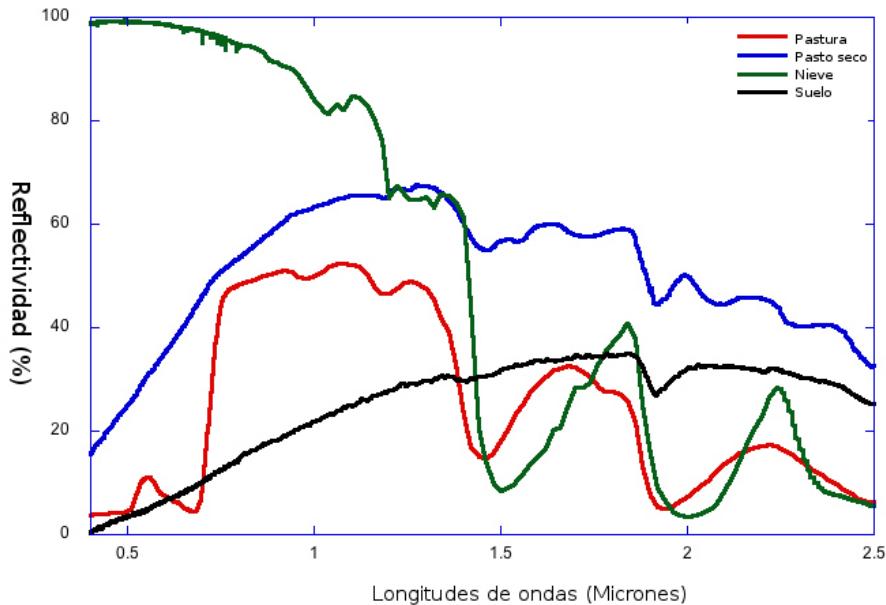


FIGURA 3.2: Firmas espectrales de diferentes coberturas.

3.1.3. Resoluciones de un sensor

La resolución de un sensor se define como el menor cambio en la magnitud de entrada que puede ser apreciada en la magnitud de salida. El concepto de resolución implica al menos cuatro manifestaciones [Oje13]:

- **Resolución espacial:** es el tamaño que representa en el terreno una unidad de pixel de la imagen. Esta resolución tiene mucha importancia en la interpretación pues marca el nivel de detalle que ofrece. En la Figura 3.3 podemos observar que cuanto menor sea el tamaño del pixel, menor será también la probabilidad de que corresponda a un compuesto de dos o más áreas fronterizas.

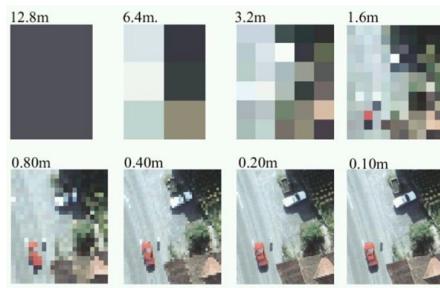


FIGURA 3.3: Resolución espacial [cha].

- **Resoluciónpectral:** indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterizaciónpectral de las distintas cubiertas. En la Figura 3.4 se puede observar la comparación entre la resoluciónpectral de dos diferentes sensores espaciales.

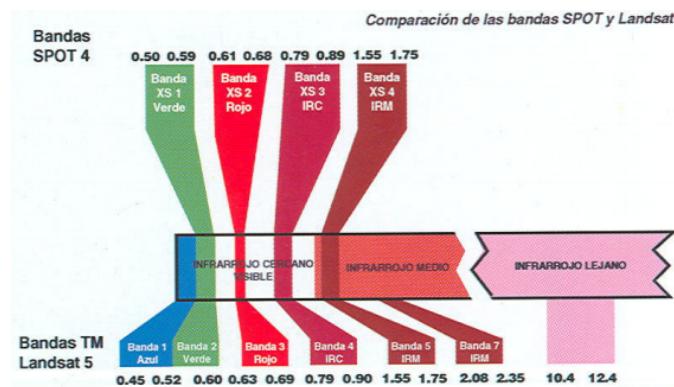


FIGURA 3.4: Resoluciónpectral igual a 3 para el sensor SPOT y 7 en el sensor Landsat [MD05].

- **Resolución radiométrica:** es la sensibilidad del sensor para detectar variaciones en la cantidad de energíaespectral recibida. La sensibilidad se expresa en bits e indica el número de los distintos niveles radiométricos que puede detectar un sensor. En la Figura 3.5 se puede observar diferentes resoluciones radiométricas.

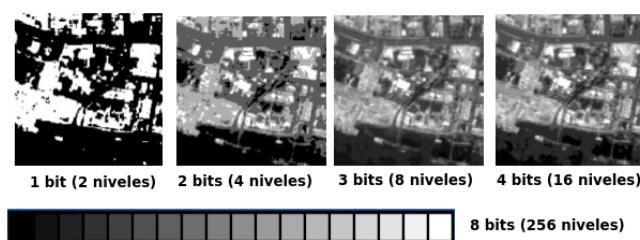


FIGURA 3.5: Diferentes resoluciones radiométricas en imágenes satelitales .

- **Resolución temporal:** Este tipo de resolución se refiere al intervalo de tiempo entre muestras sucesivas de la misma zona de la cobertura terrestre. El ciclo de cobertura presentada por la Figura 3.6, está en función de las características orbitales de la plataforma, su velocidad, el ancho de barrido del sensor y las características de construcción del sistema.

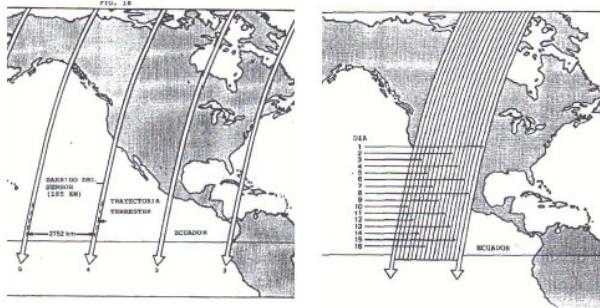


FIGURA 3.6: Resolución temporal de 16 días [tel15].

3.2. Imágenes satelitales

Una imagen satelital es una función $f : (x, y, i) \rightarrow \{0, \dots, 2^r\}$. Cada (x, y, i) indica la posición (x, y) en la banda i , donde $i \in \{1, \dots, k\}$, $x \in \{0, \dots, m\}$ e $y \in \{0, \dots, n\}$ para una matriz $m \times n$, siendo k el número de bandas y r la resolución radiométrica en la imagen. Las imágenes satelitales son conocidas también como raster [Vás11] y se puede representar de forma matricial. La Figura 3.7 nos muestra los ejes de coordenadas espaciales (x, y) para cada plano que representan las bandas, pudiendo acceder a valor de la intensidad o nivel digital mediante el nivel digital $f(x, y, i)$.

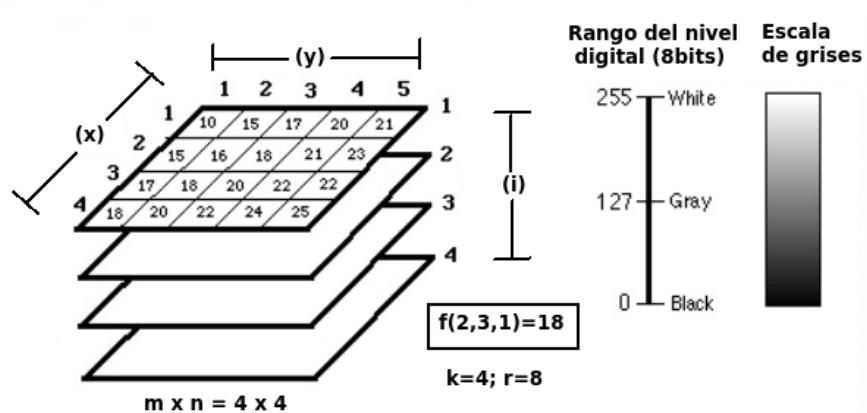


FIGURA 3.7: Valor digital en una imagen satelital de 4 bandas ($k = 4$) y resolución radiométrica $r = 8$.

3.2.1. Histogramas

El histograma de una imagen satelital, con niveles digitales en el rango de $[0, 2^r]$, es una función discreta $H(ND) = n_{ND}$, donde ND es el nivel digital y n_{ND} el número de pixeles en la imagen teniendo el nivel digital ND [Gon02].

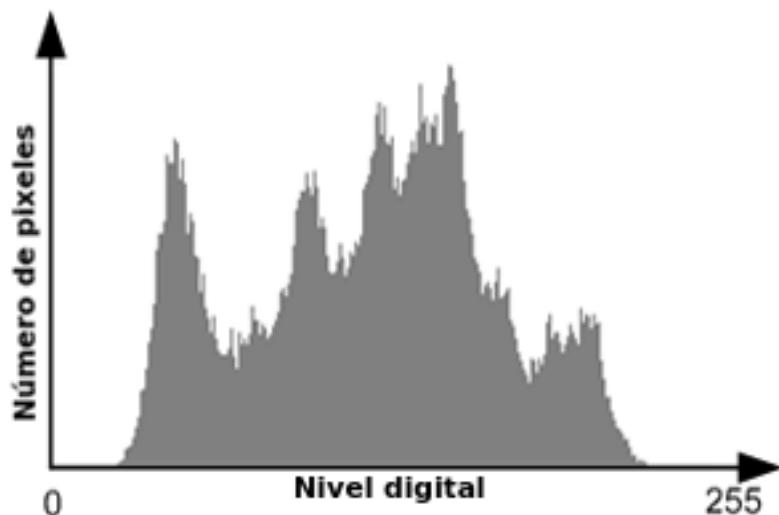


FIGURA 3.8: Histograma de una imagen con niveles digitales de 0 a 255.

El histograma de una imagen satelital es una representación gráfica útil de la información contenida por las imágenes obtenidas a través de la percepción remota. En la Figura 3.8 podemos observar que para cada nivel digital va asociado un número de apariciones en la imagen.

Los analistas a menudo despliegan el histograma en cada banda, ya que proporciona una apreciación de la calidad de los datos que presenta una imagen. Por ejemplo si el contraste es bajo o muy alto (histogramas estrechos y amplios); si son multimodales responden a distintos tipos de coberturas detectadas (agua, humedales, tipos de vegetación, etc.), si en el histograma de la banda infrarroja cercana se encuentran picos desplazados hacia la derecha implicaría que existe una alta probabilidad de aparición vegetal en la imagen, entre otros análisis.

3.2.2. Combinación de bandas

La visualización de las imágenes de teledetección es mejor cuando se tiene una representación en colores, ya que el ojo humano percibe mejor las diferencias de color que los niveles de gris.

Las combinación de tres bandas a color en las imágenes satelitales recibe el nombre de imagen de color compuesta [com]. Las imágenes de las distintas bandas se pueden combinar entre ellas para producir una imagen en color real o en falso color en función de las bandas escogidas. Esto se hace asignando a cada uno de los canales (RGB) de la pantalla de ordenador, una banda en particular.

Las imágenes compuestas en color natural o real son combinaciones de las bandas 1 (azul), 2 (verde) y 3 (rojo) que coinciden aproximadamente con la gama visual del ojo humano, por lo que se parecen bastante a lo que esperaríamos ver en una fotografía normal en color. Las imágenes de color real tienden a presentar un bajo contraste y un aspecto algo borroso. Ello es debido a que la luz azul es más afectada que las demás por la dispersión atmosférica.

Otras combinaciones de bandas distintas, generan imágenes en falso color. La naturaleza de los objetos que se quieren investigar, determina la selección de las tres bandas a combinar [com]. A continuación se describe algunas combinaciones posibles con imágenes Landsat para la identificación visual de aspectos terrestres [LKC14]:

- **Bandas 3,2,1 (RGB):** Es una imagen de color natural. Refleja el área tal como la observa el ojo humano en una fotografía aérea a color.
- **Bandas 7,4,2 (RGB):** Permite discriminar los tipos de rocas. Ayuda en la interpretación estructural de los complejos intrusivos asociados a los patrones volcánico - tectónicos.
- **Bandas 5,4,2 (RGB):** Es una imagen que no refleja los patrones en colores naturales (falso color), por lo tanto las carreteras pueden ser rojas, el agua amarilla y la vegetación azul.

- **Bandas 7,3,1 (RGB):** Ayuda a diferenciar tipos de rocas, definir anomalías de color que generalmente son de color amarillo claro algo verdoso, la vegetación es verde oscuro a negro, los ríos son negros y con algunas coloraciones azules a celestes.

La Figura 3.9 muestra como es combinada las bandas (3,4,5) en los canales (R,G,B).

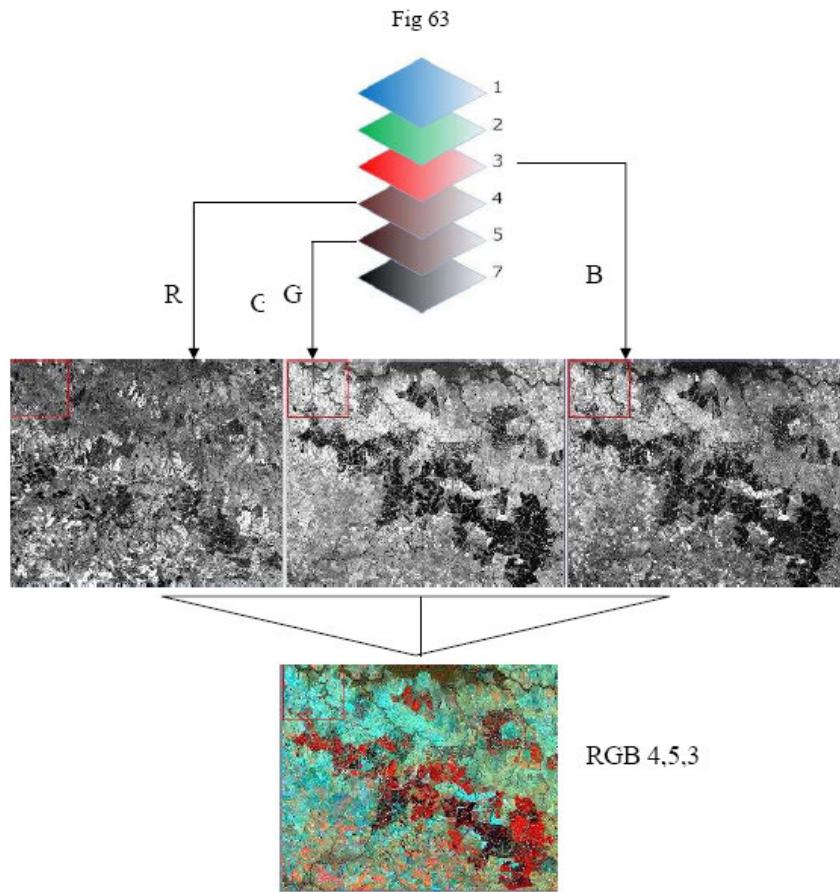


FIGURA 3.9: Combinación de bandas espectrales a través de los canales RGB.

3.3. Álgebra de mapas

El álgebra de mapas constituye un marco teórico en la mayor parte de las operaciones hechas con SIG a partir de raster. Pueden desarrollarse operaciones de muy diverso tipo que se clasifican [Tom90] en:

- **Operadores locales:** los operadores locales generan una nueva imagen a partir de una o más imágenes previamente existentes. Cada pixel de la nueva imagen recibe

un valor que es función de los valores de ese mismo pixel en las demás imágenes.

$$f_{1,2,3} = \rho(f_1, f_2, f_3) \quad (3.1)$$

Donde ρ representa a alguna función del tipo:

- Aritmético (suma, resta, multiplicación, división, raíz cuadrada, potencia, ...).
 - Lógico (AND, OR, XOR, NOT).
 - Relacional ($>$, \geq , $<$, \leq , $==$, $!=$).
 - Trigonométrico (sen, cos, tan, ...).
 - Condicional (si cumple la condición ejecuta la instrucción).

La Figura 3.10 nos muestra el proceso de operadores locales lógico y condicional. En el ítem (a), el operador lógico binariza la imagen si $DEM > 400$, mientras que en el ítem (b) el operador condicional clasifica la imagen en base a un rango ($600 - 650 = 1$; $650 - 700 = 2$; $700 - 750 = 3$; $750 - 800 = 4$).

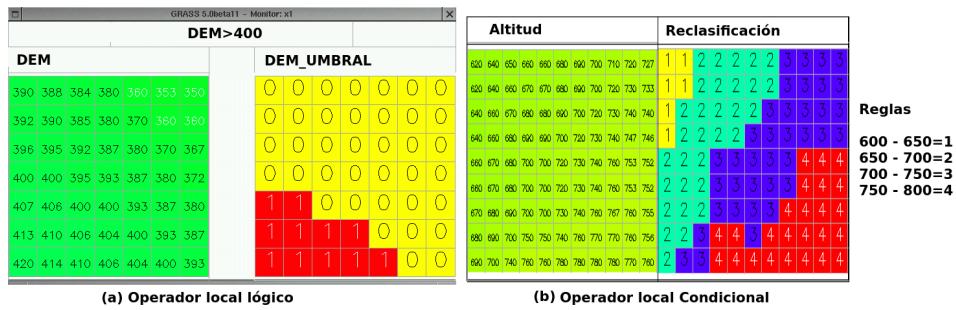


FIGURA 3.10: Operadores locales condicional y lógico.

- **Operadores de vecindad:** adjudican a cada pixel un valor que es función de los valores de un conjunto de pixeles contiguas, en una o varias imágenes. El conjunto de pixeles contiguas al pixel, más ella misma constituye una vecindad.
 - Filtrado de imágenes: es el conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la búsqueda de información.
 - Operadores estadísticos: calcula variables estadísticas (media, desviación típica, mínimo, máximo, entre otros.) a partir de los valores de todas los pixeles que forman la vecindad y lo adjudican al pixel central en la imagen de salida.

- Operadores direccionales: Permiten estimar un conjunto de parámetros relacionados con la ubicación de los diferentes valores dentro de la vecindad. Su utilidad primordial es el análisis de Modelos Digitales de Terreno (pendiente, orientación, curvatura, entre otros.)
- **Operadores de vecindad extendida:** son aquellos que afectan a zonas relativamente extensas, que cumplen determinado criterio pero cuya localización precisa no se conoce previamente. Por tanto el operador (algoritmo) debe determinar previamente cual es el área que cumple dichas características. En la Figura 3.11 podemos ver el resultado de haber aplicado un operador de vecindad extendida a partir de pixeles situados a distancias 25, 50, 75, 100, 125.

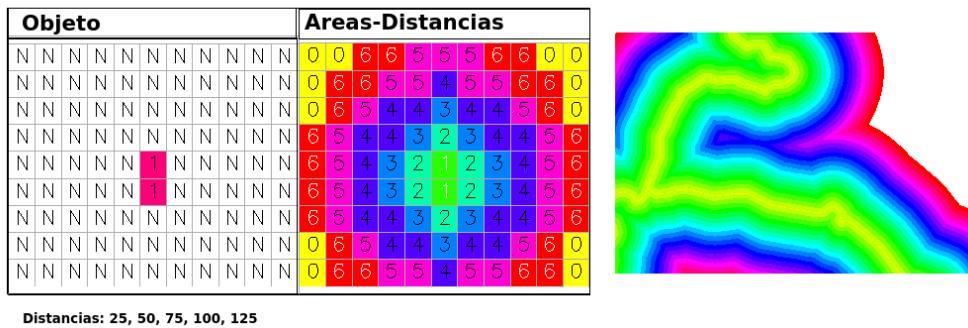


FIGURA 3.11: Áreas situadas a una distancia inferior a los valores umbrales 25, 50, 75, 100, 125.

- **Operadores de área o zonales:** son aquellos que calculan algún parámetro (superficie, perímetro, índices de forma, distancias, estadísticos) para una zona previamente conocida. Los valores pueden tratarse de diferentes niveles de una variable cualitativa o digitalizada e introducida por el usuario. En la Figura 3.12 se observa tres imágenes. La primera está clasificada en base a algún criterio (Variable cualitativa) y la otra con niveles digitales igual a la altitud (Variable cuantitativa), donde la imagen resultante corresponde a la altitud media para cada grupo.

Variable cualitativa	Variable cuantitativa	Resultado
23 23 23 23 20 20 20 20 20 20 20	402 402 401 401 400 400 395 392 386 384	394 394 394 383 383 383 383 383 383 383
23 23 23 23 20 20 20 20 20 20 20	402 402 401 401 400 400 394 393 393 390	394 394 394 394 383 383 383 383 383 383
23 23 23 23 20 20 20 20 20 20 20	402 401 401 400 394 394 390 386 380 376	394 394 394 394 383 383 383 383 383 383
23 23 23 23 23 23 20 20 20 20 20	401 401 400 395 396 398 390 386 380 373	394 394 394 394 394 394 383 383 383 383
23 23 23 23 23 23 20 20 20 20 20	401 400 396 394 386 388 385 380 375 371	394 394 394 394 394 394 383 383 383 383
23 23 23 23 23 23 20 20 20 20 20	400 396 394 389 395 395 394 390 375 370	394 394 394 394 394 394 383 383 383 383
23 23 23 23 23 23 23 20 20 20 20	397 395 390 387 392 383 390 377 375 370	394 394 394 394 394 394 383 383 383 383
23 23 23 23 23 23 23 20 20 20 20	397 393 390 387 392 393 390 377 373 370	394 394 394 394 394 394 383 383 383 383
23 23 23 23 23 10 10 10 20 20	397 383 380 387 382 383 380 377 374 371	394 394 394 394 381 381 381 381 383 383

FIGURA 3.12: Operador de área: Altitud media por áreas.

3.4. Índices de vegetación

Los índices de vegetación son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática, entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen, teniendo en cuenta el comportamiento radiométrico de la vegetación vigorosa para la elección de bandas [SZ05].

El estudio de las cubiertas vegetales mediante la teledetección se aborda tradicionalmente mediante la utilización de los denominados “índices de vegetación”, siendo el más utilizado el Índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI) [SMIY00].

3.4.1. Índice de vegetación diferencial normalizada

Sea una función $ndvi : (x, y) \rightarrow [-1, 1]$ que determina la imagen con los NDVI en cada coordenada espacial (x, y) definida por la siguiente expresión:

$$ndvi(x, y) = \frac{f(x, y, IRc) - f(x, y, R)}{f(x, y, IRc) + f(x, y, R)} \quad (3.2)$$

Donde $R \in \{1, \dots, k\}$ representa la banda roja del espectro visible y $IRc \in \{1, \dots, k\}$ a la banda infrarroja cercana del espectro infrarrojo.

En la Figura 3.13 podemos observar como las plantas muestran un fuerte pico de absorción causados por los pigmentos fotosintéticos en longitudes de onda cercanas a los 700 micrones (banda roja), hecho que contrasta con una fuerte reflexión de las longitudes

de onda del infrarrojo cercano [Sal02]. Por su parte, los suelos desnudos se caracterizan por un incremento suavemente monotónico de la reflectancia, a medida que aumenta la longitud de onda [Sal02]. Estas características relevantes nos permiten elaborar varios tipos de análisis como extracción de índices.

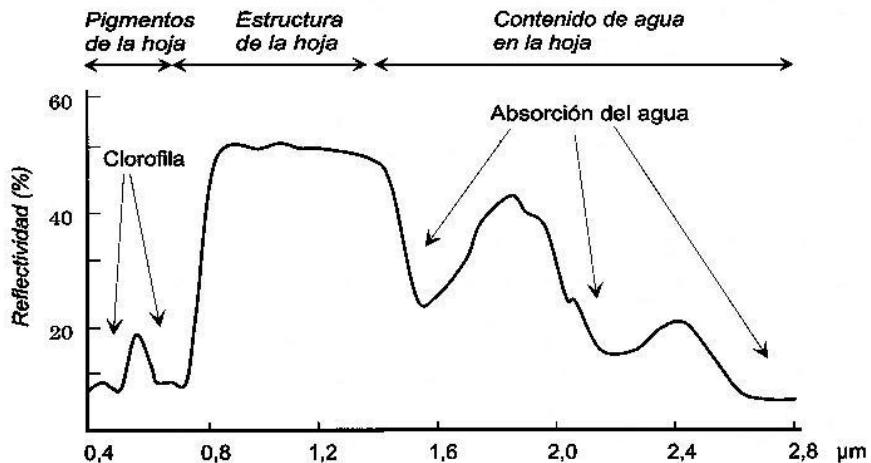


FIGURA 3.13: Firma espectral de la vegetación [ndv].

3.4.1.1. Características del NDVI

El NDVI es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde la plataforma espaciales, es decir mide las condiciones de vigor vegetal de la planta, principalmente su contenido en clorofila [Sal02]. El objetivo del NDVI es la reducción de múltiples bandas a una sola, condensando la información más importante, en este caso la vegetación.

La principal ventaja del NDVI es su fácil interpretación, ya que sus valores varían entre -1 y +1, permitiendo conocer el estado de vigor vegetal en grandes superficies y detecta fenómenos de amplio rango [Sal02].

3.5. Análisis Multitemporal

El análisis multitemporal de imágenes satelitales consiste en el estudio de zonas determinadas mediante tomas hechas en diferentes tiempos. El factor temporal puede abordarse con un doble objetivo: por un lado reconstruir la variación estacional de la zona y por

otra parte la detección de cambios. Este último objetivo se enfoca en detectar cambios entre dos o más fechas alejadas en el tiempo, estudiando el dinamismo temporal de una determinada zona como por ejemplo: el crecimiento urbano, transformaciones agrícolas, entre otras [Sal02].

En el enfoque aplicado al estudio multitemporal resulta preciso abordar previamente una serie de tratamientos sobre las imágenes satelitales de cara a garantizar su comparabilidad, ya que existen factores naturales o las del sensor, que influyen desde la captura de información hasta su transformación final a niveles digitales que afectaría el análisis.

3.6. Correcciones a las imágenes satelitales

Las correcciones satelitales son el producto de aplicar un operador a una imagen satelital para la obtención de otra. Las correcciones están definida según la expresión:

$$f' = T[f] \quad (3.3)$$

Donde f es una imagen satelital de entrada, f' es la imagen corregida y T es un operador que realiza las correcciones a la imagen f , debido a fallos en los sensores, alteraciones en el movimiento del satélite o interferencias de la atmósfera [tela].

3.6.1. Corrección geométrica

Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada; cada pixel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna como los que manejan los programas de tratamiento digital de imágenes [Tro12].

El proceso consiste en dar a cada pixel su localización en un sistema de coordenadas estandard (UTM, lambert, coordenadas geográficas) para poder combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG. El proceso obtiene una nueva imagen i' de alguna banda i de la imagen satelital, en la que cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud. En caso de que la imagen no

hubiese sufrido ningún tipo de distorsión, el procedimiento sería bastante sencillo, sin embargo una imagen puede sufrir diversos tipos de distorsiones.

Es necesario localizar puntos comunes de la imagen con puntos de control, como tarea inicial para la corrección geométrica, de manera a poder realizar una interpolación espacial y de los valores radiométricos [Tro12].

3.6.1.1. Interpolación espacial

La interpolación espacial consiste en determinar la relación geométrica entre las coordenadas del pixel de la imagen a corregir y sus coordenadas geográfica correspondientes. Utilizando los puntos comunes localizados, se plantea una ecuación de transformación mediante la cual se obtiene la posición de los píxeles en la imagen de salida, ilustrada en la Figura 3.14. Este proceso también es conocido como Georreferenciación.

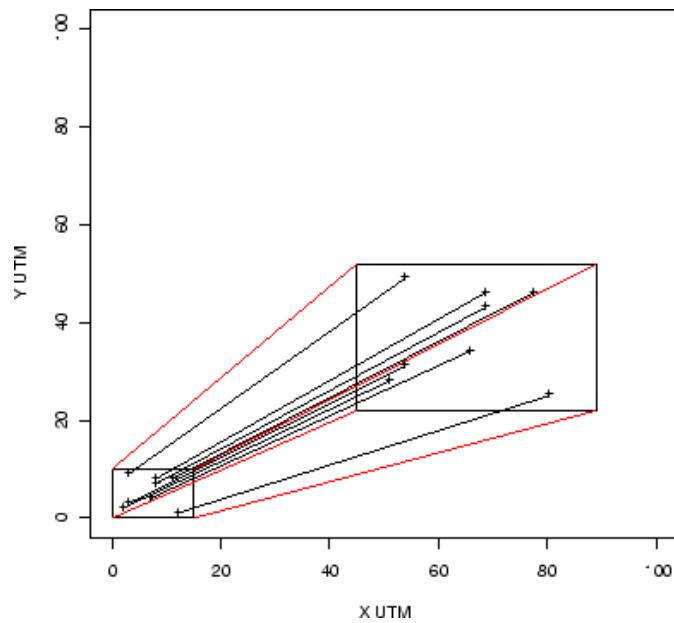


FIGURA 3.14: Localización de puntos comunes y puntos de referencia.

3.6.1.1.1. Transformación usando ecuaciones polinómicas.

El método más utilizado para la transformación es el de ecuaciones polinómicas. La

transformación puede expresarse de la siguiente manera:

$$x'_i = \sum_{j=0}^l \sum_{e=0}^{l-j} a_{ij} x_i^j y_i^e \quad (3.4)$$

$$y'_i = \sum_{j=0}^l \sum_{e=0}^{l-j} b_{ij} x_i^j y_i^e \quad (3.5)$$

Donde x'_i e y'_i indica la coordenada en la imagen corregida para la banda i . El superíndice l indica el grado del polinomio de ajuste. Los coeficientes del polinomio a_i y b_i son hallados con el método de ajuste por mínimos cuadrados entre los puntos control y los puntos de la imagen. Siendo la ecuación lineal las más simple:

$$x'_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i \quad (3.6)$$

$$y'_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i \quad (3.7)$$

En distorsiones moderadas o en un área reducida, se utilizan transformaciones de primer orden, pudiendo corregir efectos de translación en x'_i e y'_i , cambios de escala y rotación. En distorsiones más importantes o en áreas extensas, es necesario una transformación de segundo orden. Este tipo de transformación agregan a diferencia del primer orden, correcciones a deformaciones locales. En la Figura 3.15 podemos observar las transformaciones con polinomios de primer y segundo orden.

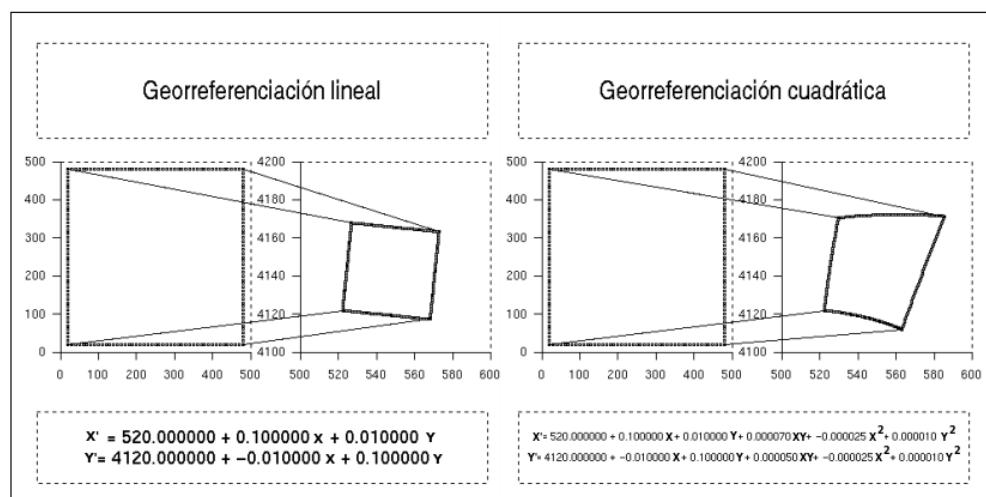


FIGURA 3.15: Interpolación espacial con polinomios de primer y segundo orden.

3.6.1.1.2. Ajuste por mínimos cuadrados

Una relación funcional $y = \alpha(x)$ entre x y y , con α desconocida y se conocen valores y_u que aproximan a $\alpha(x_u)$, o sea:

$$\alpha(x_u) = y_u + \varepsilon_u \quad (3.8)$$

Donde $u \in \{1, \dots, \eta\}$, con ε_u desconocido. El método trata de recuperar la función α a partir de los datos y_u . Si α es polinómica ($\alpha(x) = p_l(x)$), entonces, dados $\eta + 1$ puntos $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_\eta, y_\eta)$ con x_0, x_1, \dots, x_η números reales diferentes, se trata de encontrar un polinomio:

$$p_m(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_lx^l \quad (3.9)$$

que mejor se ajuste a los datos y sea mínimo. En otras palabras:

$$s(a_0, a_1, \dots, a_l) = \sum_{u=0}^{\eta} (p_m(x_u) - y_u)^2 = \sum_{u=0}^{\eta} \left(a_0 + a_1x_u + a_2x_u^2 + \dots + a_lx_u^l - y_u \right)^2 \quad (3.10)$$

Donde s es el conjunto de coeficientes del polinomio.

3.6.1.1.3. Calidad de la interpolación espacial

La calidad en la interpolación espacial y los puntos de control seleccionados η se calcula utilizando el promedio de los errores cuadráticos medios (RMS), que consiste en la diferencia entre la coordenada transformada deseada para un punto de control y la coordenada real obtenida como salida.

$$RMS_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{\eta} ((x'_{i,j} - x_{i,j})^2 + (y'_{i,j} - y_{i,j})^2)}{\eta}} \quad (3.11)$$

El valor de RMS elegido por referencia para corregir una imagen debe ser aproximadamente 0,5, y en lo posible nunca superar la unidad [Gui99].

La Figura 3.16 nos muestra la manera de como es calculado el RMS para un punto de control determinado.

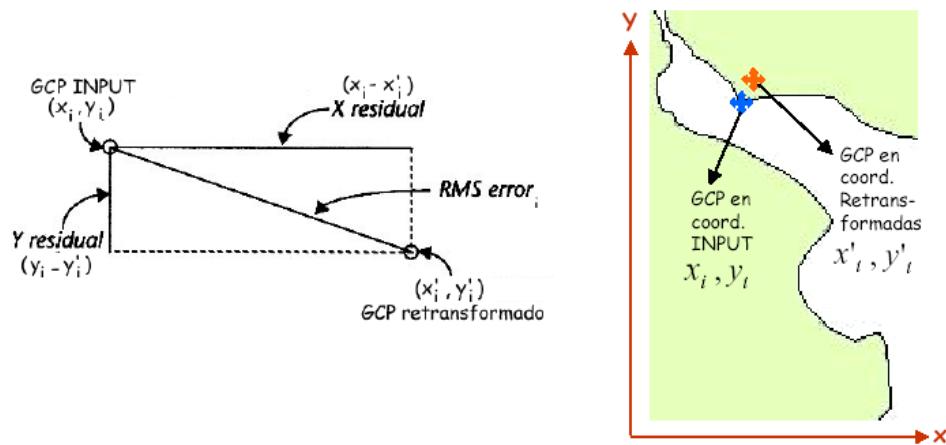


FIGURA 3.16: Error RMS de un punto de control (x, y) y su transformación (x', y').

3.6.1.2. Interpolación de los valores radiométricos

La interpolación de los valores radiométricos es el traslado del nivel digital perteneciente a la imagen original a la imagen corregida espacialmente. La imagen original debe corresponderse con las coordenadas de la imagen corregida. La interpolación puede ser abordada por tres métodos diferentes:

- **Vecino más próximo:** situá en cada pixel de la imagen corregida el nivel digital (ND) del pixel más cercano en la imagen original. Constituye la solución más rápida y la que supone menor transformación en los niveles digitales originales. Su principal inconveniente es que produce una distorsión en rasgos lineales en la imagen (fracturas, carreteras, caminos), que pueden aparecer en la corregida como lineales quebradas.

En la Figura 3.17 se observa el como los píxeles de la imagen transformada son trasladados a la imagen corregida a lado del vecino más próximo.

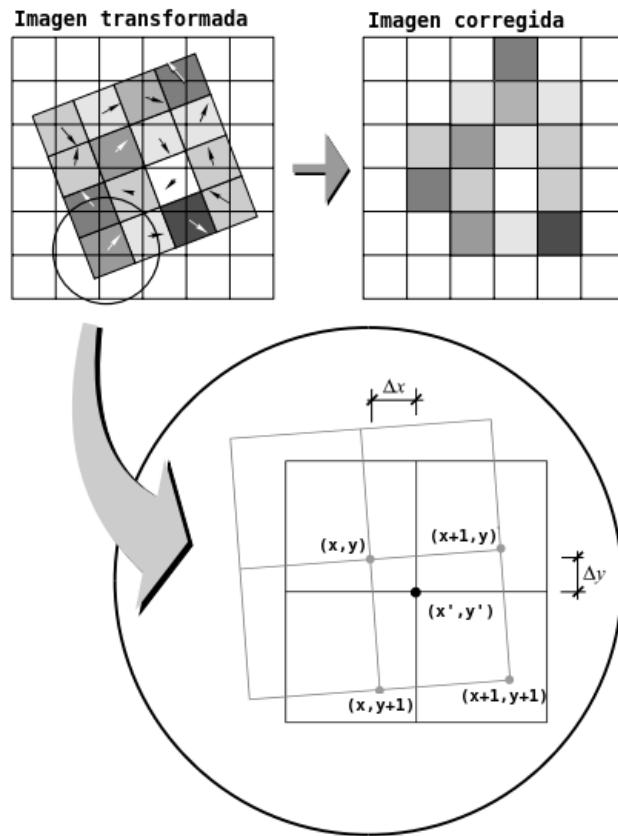


FIGURA 3.17: Interpolación Vecino más Cercano.

- **Interpolación bilineal:** Considera el valor de los 4 pixeles mas cercanos en la imagen de entrada para asignar el nuevo valor de la imagen de salida. Las ventajas son que no existe el efecto de escalones en los bordes pudiendo aparecer en el vecino superior izquierdo y ademas cuenta con mejor exactitud espacial. El método es utilizado a menudo cuando se cambia el tamaño de las celdas en los datos. La desventaja es que como los pixeles son promediados, algunos extremos de los valores de los datos pueden perderse. En la Figura 3.18 podemos observar los 4 pixeles cercanos tomados para la interpolación.

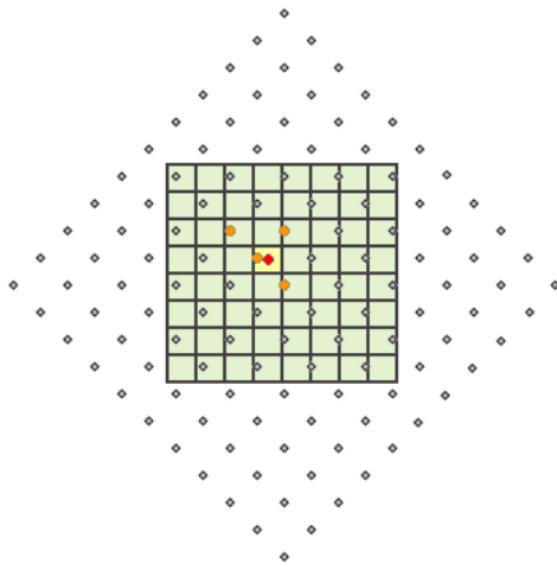


FIGURA 3.18: Interpolación Bilineal.

- **Convolución cúbica:** es similar a la interpolación bilineal pero considera niveles digitales de los 16 pixeles más próximos. El efecto visual es mejor, pero supone un volumen de cálculo mucho más elevado. La Figura 3.19 nos muestra los 16 pixeles tomados en el método.

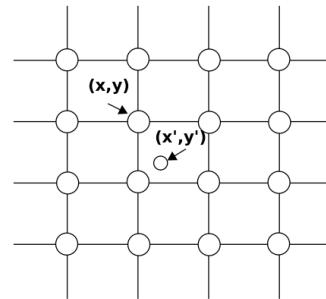


FIGURA 3.19: Convolución cúbica.

3.6.2. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica se encarga de minimizar los desajustes producidos en el registro del valor digital en los pixeles de la imagen, de hecho en algunos casos las estaciones receptoras llevan a cabo algún tipo de corrección en el momento de recepción de la imagen. La corrección radiométrica implica por una parte la restauración de líneas o píxeles perdidos y por otra la corrección del bandeadío en la imagen [tela].

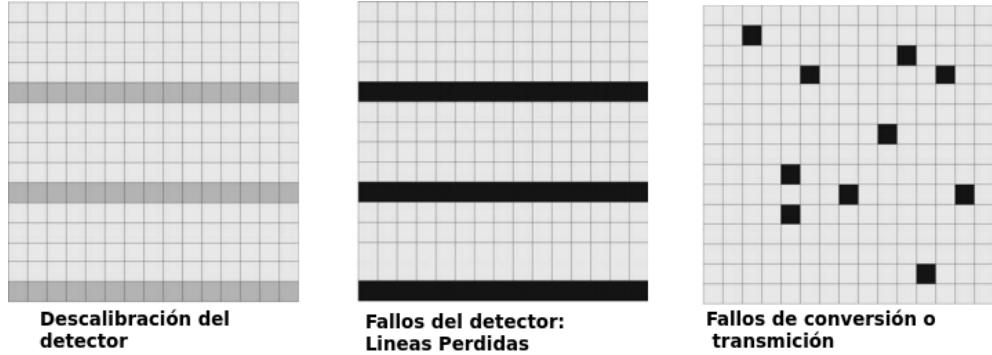


FIGURA 3.20: Fallos del sensor en la captura de la imagen.

La Figura 3.20 nos muestran tres tipos de errores radiométricos frecuentes, donde las líneas claras representan pixeles que no representan su nivel digital correcto a causa de la descalibración del sensor. Las líneas y pixeles negros son pixeles nulos que no pudieron ser convertidos a su nivel digital por fallos en el detector o transmisiones, como también por conversiones de la información analógica a digital.

3.6.2.1. Pixeles o líneas perdidas

Sea f' una imagen satelital con los pixeles corregidos, mediante estimaciones de la media entre los pixeles adyacentes. Donde cada nivel digital es calculado de la siguiente manera:

$$f'(x, y, i) = \text{ceiling}(1/2 \times [f(x - 1, y, i) + f(x + 1, y, i)]) \quad (3.12)$$

Donde $\text{ceiling}()$ representa la función techo (redondeo para arriba). No es recomendable utilizar los pixeles adyacentes de la misma línea (eje y) por que han sido captados por el mismo detector o banda que ha dado el fallo, por tanto son poco fiables.

La bandas de una imagen son de detectores diferentes y están altamente correlacionadas, por lo que se hace una modificación a la ecuación 3.12 teniendo en cuenta la banda i_* de la imagen satelital, donde $i_* \in [1, k]$, pudiendo utilizarse el valor del pixel faltante en una banda diferente para mejorar la estimación:

$$f'(x, y, i) = \text{ceiling}(dif_i + \frac{\sigma_i}{\sigma_{i_*}} \times [f(x, y, i_*) - dif_{i_*}]) \quad (3.13)$$

Donde σ_i representa la desviación típica de la banda i , σ_{i*} representa la desviación típica de la banda i_* y la variable dif_e , esta representada por la siguiente expresión:

$$dif_e = 1/2 \times [f(x - 1, y, e) + f(x + 1, y, e)] \quad (3.14)$$

Donde $e \in \{i, i_*\}$. En caso de que la imagen abarque un territorio amplio y cambiante resulta recomendable calcular las desviaciones típicas (σ_i y σ_{i*}) en un entorno cercano al pixel perdido.

Para detectar líneas perdidas se compara la media de los ND de una línea con las medias de las líneas anterior y posterior, para detectar píxeles perdidos se compara el valor de un pixel con los de los 8 píxeles.

3.6.2.2. Bandeado

El fenómeno del bandeado se debe a una mala calibración entre detectores y resulta especialmente visible en las zonas de baja radiancia (zonas marinas por ejemplo). El resultado es la aparición periódica de una banda más clara u oscura que las demás. Para corregir el bandeado se asume que, en caso de no haber error, los histogramas obtenidos por cada uno de los detectores serían similares entre sí y similares al histograma global de la imagen que se toma como referencia.

En primer lugar se calculan los coeficientes m y s para una corrección lineal de cada uno de las bandas.

$$m = \frac{\sigma_i}{\sigma_{i*}} \quad (3.15)$$

$$s = \mu_i - m \times \mu_{i*} \quad (3.16)$$

Siendo μ_i y μ_{i*} las medias para la banda i e i_* . Donde cada nivel digital de la imagen satelital f' es calcula de la siguiente manera:

$$f'(x, y, i) = m \times f(x, y, i) + s \quad (3.17)$$

En Figura 3.21 podemos observar el histogramas de una banda corregida en función a las demás bandas pertenecientes a una imagen satelital.

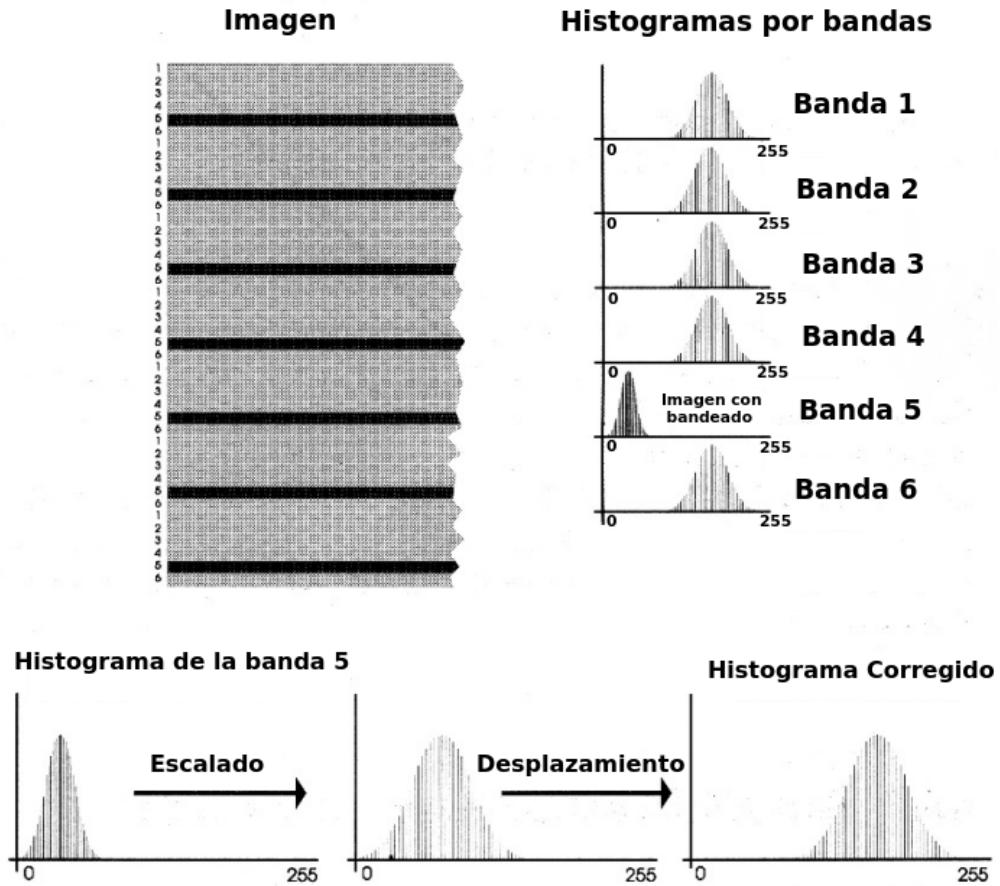


FIGURA 3.21: Proceso de corrección del bandeo.

3.7. Proceso de detección de cambios

En los métodos comunes de detección de cambios se asigna un valor correspondiente al grado de cambio sobre cada pixel, independientemente del resto de la imagen satelital. En estos métodos se considera el pixel como unidad básica (álgebra de mapas) para aplicar las correspondientes operaciones matemáticas asociadas a cada algoritmo.

Los métodos de comparación, generan una imagen (índice de cambios) que representa el grado de cambio entre dos situaciones temporales; los píxeles de la imagen resultante, contienen una variable continua de tipo cuantitativo (Niveles digitales), por lo que se requieren técnicas que los conviertan en variables cualitativa (Categorías) [MG13].

3.7.1. Normalización Radiométrica

La normalización radiométrica pretende optimizar el proceso de comparación mejorando la semejanza entre imágenes. La distintas respuestas espectrales que presentan las coberturas vegetales en diferentes estaciones del año o condiciones ambientales en el momento de la captura hace necesario un procedimiento adicional que iguale los píxeles en relación a contraste y brillo entre imágenes. La normalización mediante parámetros estadísticos de las imágenes fue utilizado ya que representa un método óptimo para comparar imágenes satelitales donde el cambio es reducido [MR99].

Las distintas bandas de una imagen satelital presentan un comportamiento con distribución normal en sus histogramas [MG13], por lo que teniendo una variable tipificada (Z) es posible definirlos en una distribución normal estándar del tipo $N(0, 1)$ (media 0 y desviación 1) según la expresión:

$$Z = \frac{f_1(x, y, i) - \mu_{i,1}}{\sigma_{i,1}} \quad (3.18)$$

Aplicando este concepto sobre cada una de las dos imágenes, se pueden comparar siendo ambas distribuciones estandarizadas:

$$\frac{f_1(x, y, i) - \mu_{i,1}}{\sigma_{i,1}} = \frac{f_2(x, y, i) - \mu_{i,2}}{\sigma_{i,2}} \quad (3.19)$$

Para su aplicación práctica, se puede transformar el nivel digital $f_1(x, y, i)$ perteneciente a la imagen 1, para que se asemeje al $f_2(x, y, 2)$ de la imagen 2, ambas de la banda i , expresión:

$$f_1^{Norm}(x, y, i) = \mu_{i,2} + \frac{\sigma_{i,2}}{\sigma_{i,1}} \cdot (f_1(x, y, i) - \mu_{i,1}) \quad (3.20)$$

Siendo $f_1^{Norm}(x, y, i)$ la imagen normalizada definida por una relación lineal entre las dos distribuciones. Los coeficientes de la transformación $m_{1,2}$ y $h_{1,2}$ se definen según se indica en la expresión:

$$h_{1,2} = \mu_{i,2} - \frac{\sigma_{i,2}}{\sigma_{i,1}} \cdot \mu_{i,1} \quad (3.21)$$

$$m_{1,2} = \frac{\sigma_{i,2}}{\sigma_{i,1}} \quad (3.22)$$

$$f_1^{Norm}(x, y, i) = m_{1,2} \cdot f_1(x, y, i) + h_{1,2} \quad (3.23)$$

La transformación obtiene histogramas parecidos, logrando de este modo mayor semejanza para el proceso de comparación multitemporal. En la Figura 3.22 podemos observar el histograma de la secuencia de imágenes y el histograma de la imagen resultante luego de la normalización.

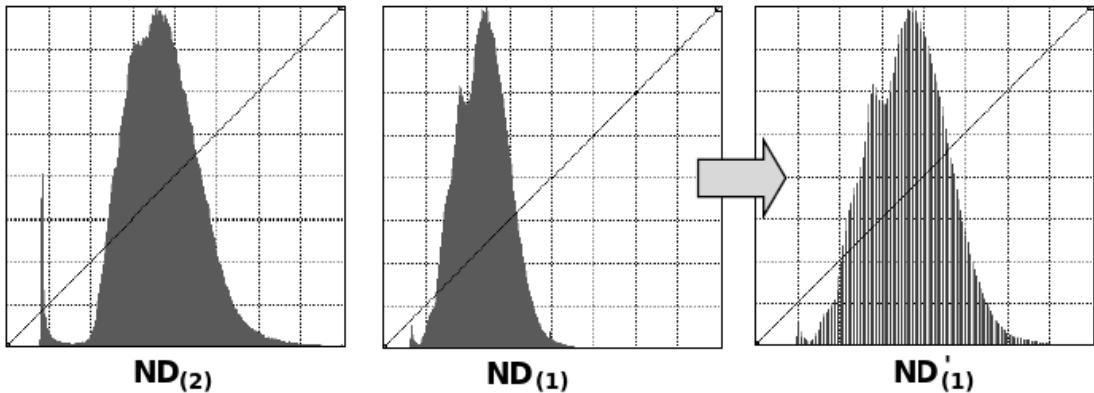


FIGURA 3.22: Normalización Radiométrica.

3.7.2. Comparación multitemporal

La comparación parte de un par de imágenes semejantes que abarcan la misma zona de estudio, siguiendo una secuencia multitemporal. Una secuencia multitemporal está definida por $\{f_t\}_{t \in \mathbb{N}}$, que representa una secuencia de imágenes satelitales de la misma zona en diferentes tiempos. Las operaciones más utilizadas son [Chu98]:

- **Diferencia de imágenes:** es el método más simple, fácil de interpretar y directo, ya que consiste en una diferencia algebraica entre los niveles digitales (ND) inicial y final para la obtención de un índice (I_{dif}). Normalmente es realizada combinada con extracciones de índices espectrales.

$$I_{dif} = f_{t_*} - f_t \quad (3.24)$$

Donde $t_* \neq t$.

- **Ratio:** se obtiene aplicando la operación de cociente, entre los niveles digitales (ND) inicial y final para la obtención de un índice (I_{ratio}). Podría generar mejores

resultados pero no se ajusta a una distribución normal.

$$I_{ratio} = \frac{f_{t*}}{f_t} \quad (3.25)$$

Estas dos operaciones generan una imagen con índices de cambios I_c a partir de cada conjunto de datos multitemporal, dando lugar a tantos mapas de cambios como bandas/capas se consideren.

3.7.3. Criterios de decisión

El resultado de los cálculos es una imagen en donde el valor de salida indica el grado de cambio, desde la mayor pérdida a la mayor ganancia, en una escala gradual. Si se pretende generar una imagen binaria (cambio/estable), es preciso señalar un umbral que delimita ambas categorías en las imágenes. Ahí se plantea un problema de difícil solución ya que no existen criterios de aplicación general.

Si el cambio abarca un sector importante de la imagen, el histograma de la imagen de cambios (I_c) debiese mostrar un perfil bimodal, lo que permitiría establecer umbrales naturales de cambio, aunque esta situación no es muy habitual, ya que los cambios en la naturaleza no suelen producirse de modo abrupto [MG13].

Si es necesario establecer un umbral para separar las áreas de cambio, puede optarse por señalar algún criterio estadístico, como la media y la desviación típica de una serie de píxeles elegidos aleatoriamente. En ocasiones se ha propuesto utilizar unas áreas de entrenamiento para calcular que rango de desviación se podía considerar límite para píxeles estables, aplicando luego ese valor al conjunto de la imagen [TL88].

3.7.3.1. Discriminación de las zonas de cambio

La comparaciones multitemporales generan indices que corresponden a variables cuantitativas, por lo que la aplicación de métodos que discriminan las zonas, en tipos de cambios, permitirán un análisis mas específico sobre la imagen satelital.

Sea $B : I_c \rightarrow \{0, 1\}$ una función que binariza una imagen en base a un Umbral U :

$$B(I_c) = \begin{cases} 1 & \text{si se cumple que } I_c \geq U \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (3.26)$$

La ecuación 3.26 genera una máscara binaria de cambios (0, No Cambio; 1, Cambio) aplicando un umbral (U) específico sobre la imagen resultante del proceso de comparación multitemporal [Sin89]. Son fácilmente implementables en procesos de carácter automático/semiautomático. Partiendo de la hipótesis de que el porcentaje de cambios es muy reducido, los valores correspondientes se encuentran situados en los extremos del histograma de frecuencias [ERdR04]. Es preciso señalar un umbral que delimita ambas categorías (cambio/no cambio) a partir del índice de cambios [RAAKR05] para generar una máscara.

El método de discriminación basado en los parámetros estadísticos del índice de cambio entre la secuencia temporal de imágenes tiene la siguiente expresión [RGGSCO⁺10]:

$$U = \mu_{I_c} \pm n \times \sigma_{I_c} \quad (3.27)$$

Donde el valor de umbral entre cambio/no cambio (U) se estima en función a la media (μ_{I_c}) y desviación (σ_{I_c}) de la imagen de Indice de cambio (I_c), junto con un coeficiente de tolerancia n asignado en base a la fiabilidad de los datos. Los resultados se clasifican en función de n ; alta probabilidad de cambio ($n \geq 2$) y zonas de media probabilidad de cambio ($1 < n < 2$) [ERdR04].

3.7.4. Filtrado

Los filtros constituyen unos de los principales métodos del procesamiento digital de imágenes . Pueden usarse para distintos fines, pero siempre, el resultado sobre cada pixel depende de los pixeles en su entorno. Tiene como objetivos:

- **Suavizar la imagen:** reducir las variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.
- **Eliminar ruido:** modificar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos.

- **Realzar la imagen:** aumentar las variaciones de intensidad, allí donde se producen.
- **Detectar bordes::** detectar aquellos píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad.

3.8. Resumen

La utilización de imágenes satelitales implica un pre-procesamiento adicional, diferente a las que se le realiza a imágenes normales. Estos pre-procesamientos van ligados a resoluciones, firmas espectrales y tipos de imágenes satelitales propias del sensor espacial que captura la información. En este capítulo se describen conocimientos previos para aplicar análisis multitemporales y detección de cambio en imágenes de satélite que componen piezas fundamentales en la metodología propuesta.

Capítulo 4

Materiales y Metodología

En este capítulo se describirán los materiales a utilizar en la elaboración de la metodología, así como también aquellos a utilizar en las diversas pruebas y validaciones. Además se presentan las diversas características de las imágenes satelitales a ser empleados en el estudio. La metodología nos presenta los diferentes procesos o módulos necesarios para la estimación de pérdida de carbono.

4.1. Materiales

Un grupo de imágenes fueron utilizadas para los diferentes estudios y procedimientos de la metodología, tales como:

- Imágenes satelitales Landsat.
- Imágenes Campos Continuos de Vegetación (VCF).
- Imagen Mapa global de carbono - Paraguay.
- Paraguay Forest Change Product.

En el procesamiento e implementación de algoritmos fueron utilizados dos aplicaciones:

- GRASS.
- Quantum GIS.

A continuación se hablarán con mayor detalle de los elementos citados.

4.1.1. Imágenes

En este apartado se pretende brindar las diferentes características que presentan cada tipo de imagen utilizada en este trabajo..

4.1.1.1. Landsat

Landsat representa la colección más larga y continua en el mundo de imágenes satelitales con resoluciones moderadas [lan13]. Cuatro décadas de imágenes proporciona un recurso único para personas que trabajan en la agricultura, geología, silvicultura, ordenación territorial, educación, cartografía e investigación del cambio global, como también en respuesta de emergencias y operaciones de socorro.

Las imágenes están disponibles desde 1972 generados por una serie de 6 satélites Landsat. Estos satélites han sido un componente importante del Programa de Observación de la tierra perteneciente a la NASA, con tres sensores primarios evolucionando a lo largo de treinta años: MSS (Multi-spectral Scanner), TM (Thematic Mapper), y ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). El 11 de febrero del 2013 fue lanzado el Lansadt 8 correspondiendo al futuro de los satélites Landsat con dos nuevo sensores, Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). La Tabla 4.1 nos muestra las diferentes resoluciones de los sensores Landsat.

Landsat	Resoluciones				
	Espacial	Espectral	Radiométrica	Temporal	Sensor
1	79x79 m ²	5 bandas	6 bits	18 días	MSS
2	79x79 m ²	5 bandas	6 bits	18 días	MSS
3	79x79 m ²	5 bandas	6 bits	18 días	MSS
4	30x30 m ²	7 bandas	8 bits	16 días	TM
5	30x30 m ²	7 bandas	8 bits	16 días	TM
6	30x30 m ²	8 bandas	8 bits	16 días	ETM+
7	30x30 m ²	8 bandas	8 bits	16 días	ETM+
8	30x30 m ²	9 bandas	12 bits	16 días	OLI/TIRS

TABLA 4.1: Resoluciones de los satélites Landsat.

El Sistema de Referencia Mundial Landsat-2 (WRS-2: Landsat Worldwide Reference System-2) provee un esquema de indexación para el patrón de repetición de la trayectoria orbital terrestre seguida por las plataformas espaciales Landsat 4, 5 y 7 sobre los 16 días de su repetitivo ciclo orbital [els]. El original WRS (WRS-1) fue diseñado para las

misiones Landsat 1, 2, y 3, las cuales se movieron en una órbita más alta. El actual WRS-2 fue diseñado para la órbita a 705 Km usada para las últimas misiones. En la Figura 4.1 podemos observar los índices (Path y Row) en el momento de la obtención de una imagen satelital Landsat para una zona.

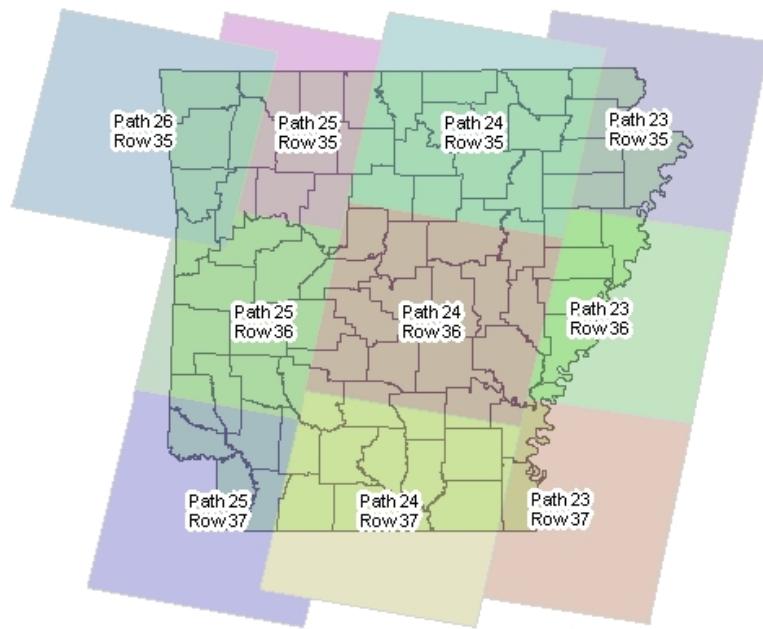


FIGURA 4.1: Ejemplo WRS-2 Path/Row

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) es una agencia científica de los Estados Unidos, el cual proveen un producto llamado L1T (Level 1 Terrain Corrected) que implica las imágenes Landsat con datos pre-procesados para una corrección radiométrica sistemática y corrección geométrica mediante la incorporación de puntos de control en tierra. Estos productos están en la Web de forma gratuita [lan13].

4.1.1.2. Campos Continuos de Vegetación (VCF)

Las imágenes VCF contienen estimaciones proporcionales para los tipos de cobertura vegetal: vegetación leñosa, vegetación herbácea y suelo desnudo. El producto se deriva de las siete bandas del sensor MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

a bordo del satélite Terra, perteneciente a la NASA. El esquema de clasificación continuo del VCF puede representar áreas terrestres heterogéneas mejor que los esquemas tradicionales de clasificación discreta. Los sistemas de clasificación tradicionales indican donde se concentran los tipos de cobertura del suelo. El VCF posee un resolución espacial de 250x250 metros cuadrados y la colección de imágenes se encuentra disponible gratuitamente en la Web [gl215]. La Figura 4.2 nos presenta un imagen, con diferentes tonalidades de color, para los porcentajes de vegetación y los niveles digitales del agua como pixeles nulos.

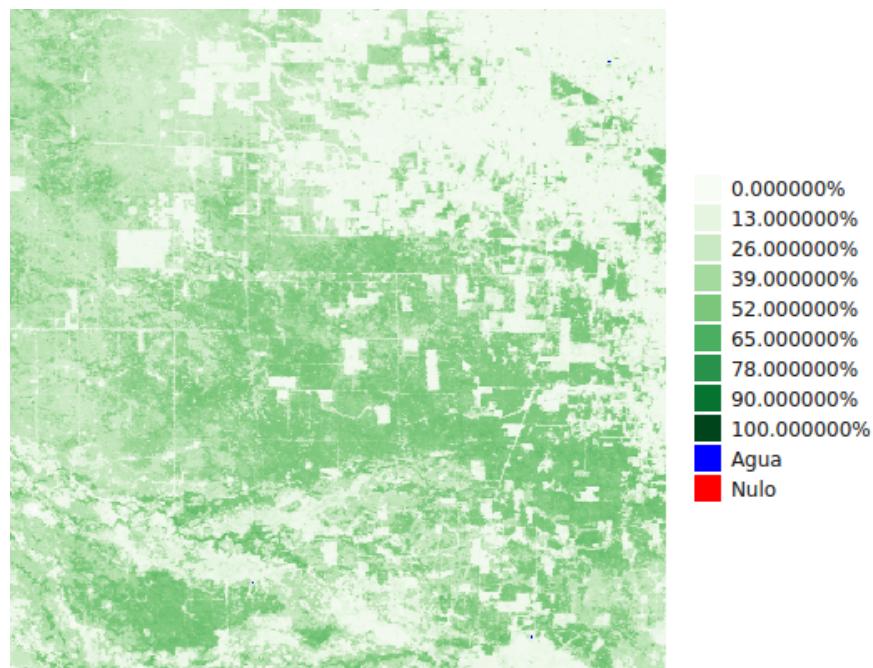


FIGURA 4.2: Imagen VCF con diferentes tonalidades de color de acuerdo al porcentaje de vegetación.

4.1.1.3. Mapa global de carbono - Paraguay

El mapa global de carbono [SHB⁺¹¹] nos provee la densidad de carbono, expresada en toneladas de carbono por hectárea, del área ocupada por un pixel. En la actualidad existen diferentes mapas de carbono a nivel mundial [SHB⁺¹¹]. La Figura 4.3 representa el mapa global de carbono disponible para el Paraguay.

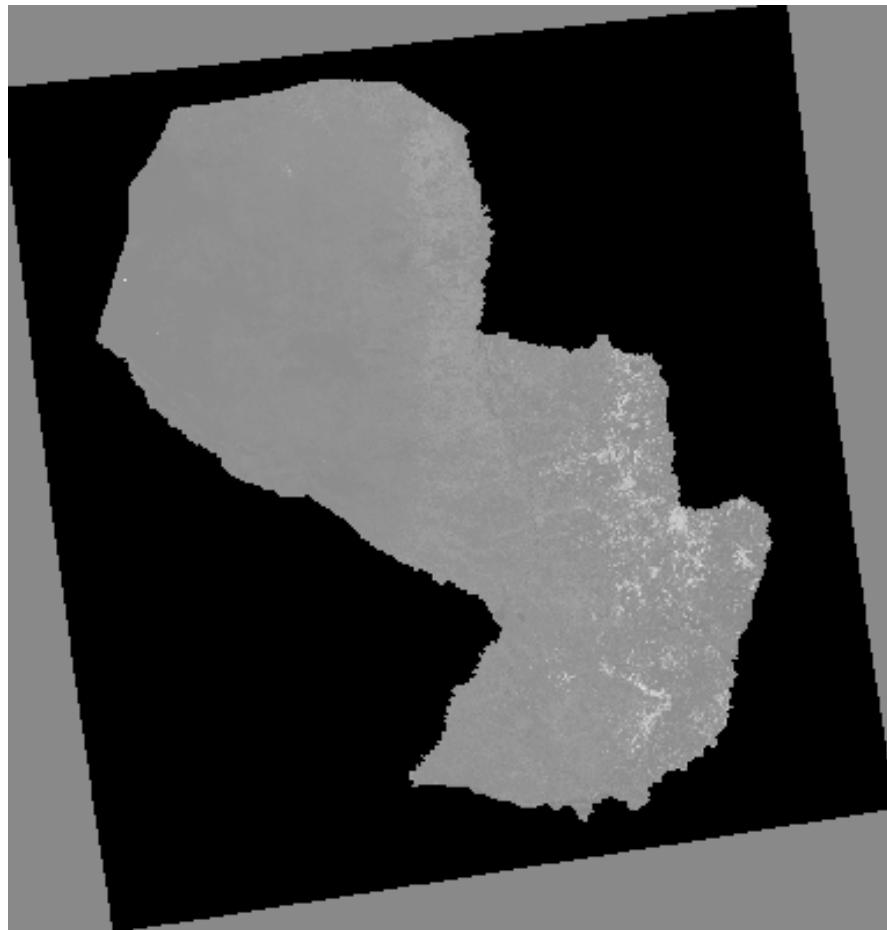


FIGURA 4.3: Mapa Global de Carbono - Paraguay

4.1.1.4. Paraguay Forest Change Product

El Paraguay Forest Change Product (PFCP) muestra donde ocurrió la deforestación en Paraguay durante 1990-2000. El PFCP fue elaborado a partir de las imágenes Landsat TM y ETM+, identificando seis clases; bosque atlántico, Chaco bosques, el agua, no forestales y la deforestación. El producto puede ser utilizado para determinar procesos y patrones de cambio en la cubierta forestal. En la Figura 4.4 se puede observar el PFCP (disponible gratuitamente [[gl215](#)]). En la Tabla 4.2 se describe la representación de cada nivel digital en dicha imagen. .

Valor digital	Representación	Color sugerido
1	Bosque Atlántico	Verde
2	Bosque Chaqueño	Verde Claro
3	No Bosque	Aqua
4	Aqua	Azul
5	Pérdida Bosque Atlántico	Rojo
6	Pérdida Bosque Chaqueño	Purpura Claro

TABLA 4.2: Representación del valor digital en la imagen PFCP.

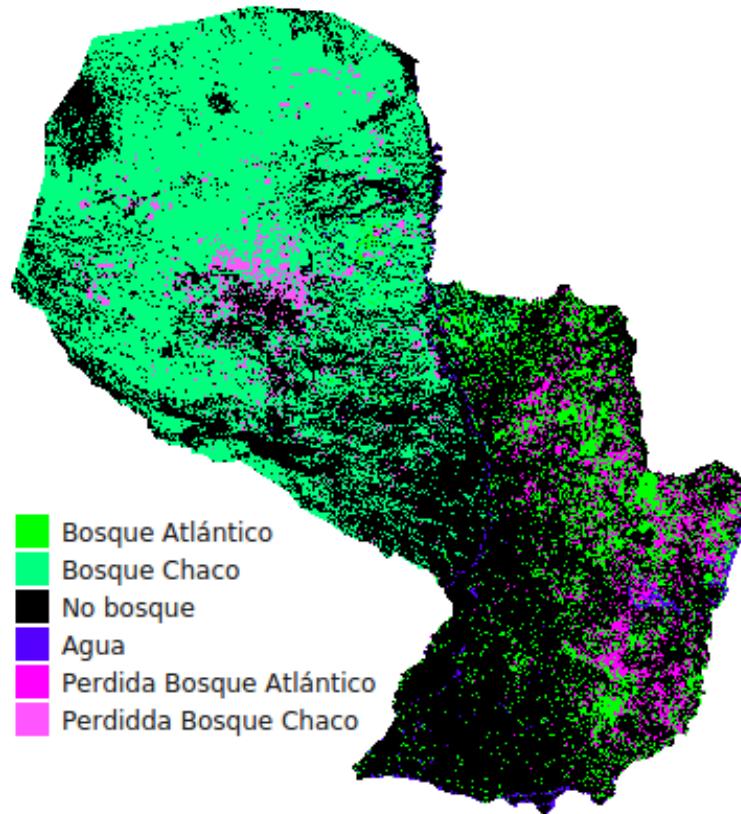


FIGURA 4.4: Paraguay Forest Change Product

4.1.2. Aplicaciones

Sistemas de información geográfica fueron utilizados para la manipulación de imágenes satelitales, como también para diseñar e implementar los algoritmos utilizados en la metodología propuesta. A continuación se describen las aplicaciones utilizadas.

- **GRASS:** es un software SIG bajo licencia GPL (software libre) [osg15]. El software soporta información tanto raster como vectorial y posee herramientas de procesado digital de imágenes. Esta disponibles principalmente para plataformas Linux.

- **Quantum GIS:** es un SIG de código libre para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. La principal diferencia con el GRASS es la interfaz amigable con que cuenta y la facilidad de integración con nuevas funciones espaciales desarrollados por los usuarios [QGI15].

4.2. Metodología

La metodología busca que los algoritmos a implementar sean ligeros en cada proceso, para así evitar cálculos complejos y excesivas supervisiones. En los procedimientos es necesario realizar estudios previos a la respuesta espectral que presenta la vegetación en los sensores remotos, de manera a determinar variables fijas en la metodología.

Los datos de entrada son las imágenes Landsat, cuya elección es debido a la disponibilidad presentada en el tiempo y gratuidad en la obtención. Las imágenes Landsat 8 no deben ser mezcladas con imágenes de otro sensor del mismo satélite, ya que esta posee una resolución radiométrica de 16 bits y las demás son capturadas a 8 bits. Por último las bandas utilizadas corresponde a la infrarroja cercana y roja.

La Figura 4.5 representa el flujo de procedimientos aplicados a las imágenes satelitales para la obtención de la imagen de perdida de carbono junto con la cuantificación del mismo.

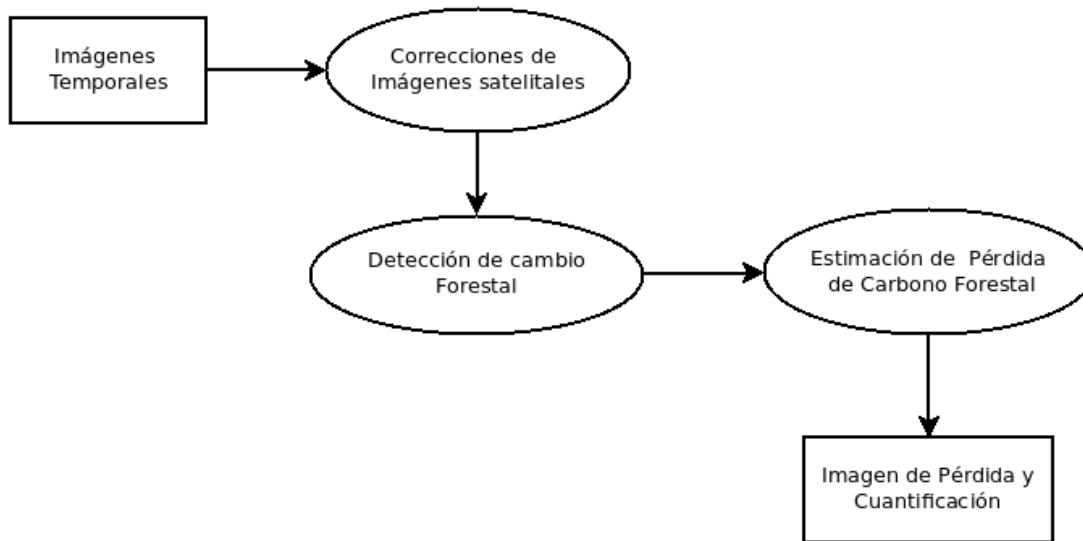


FIGURA 4.5: Diagrama de flujo. Metodología propuesta

4.2.1. Correcciones de imágenes satelitales

Los pixeles de las imágenes satelitales deben tener una ubicación suficientemente aproximada a la realidad del terreno, de manera que se garantice la correspondencia geográfica entre pixeles a ser comparados. Por ello, el pre-procesamiento de las imágenes aplicando correcciones geométricas y radiométricas son necesarios.

4.2.1.1. Corrección Geométrica

Este procedimiento es más conocido como georreferenciación y es realizado para que los pixeles de la imagen satelital correspondan a sus coordenadas en el terreno. El procedimiento consiste en 3 fases:

- Relevamiento de puntos de control.
- Interpolación espacial.
- Interpolación radiométricos.

El proceso de interpolación espacial necesita la recopilación de puntos de control dispersos en la imagen (más detalles ver sección 3.6.1). La recopilación es realizada por

medio de visitas al terreno o mediante el relevamiento de datos cartográficos existentes (mapa de caminos, ríos, cruces, entre otros.). La Figura 4.6 nos muestra los puntos de control relevadas en el terreno junto con su ubicación dentro de la imagen satelital que son utilizadas en la determinación de la ecuación de transformación.

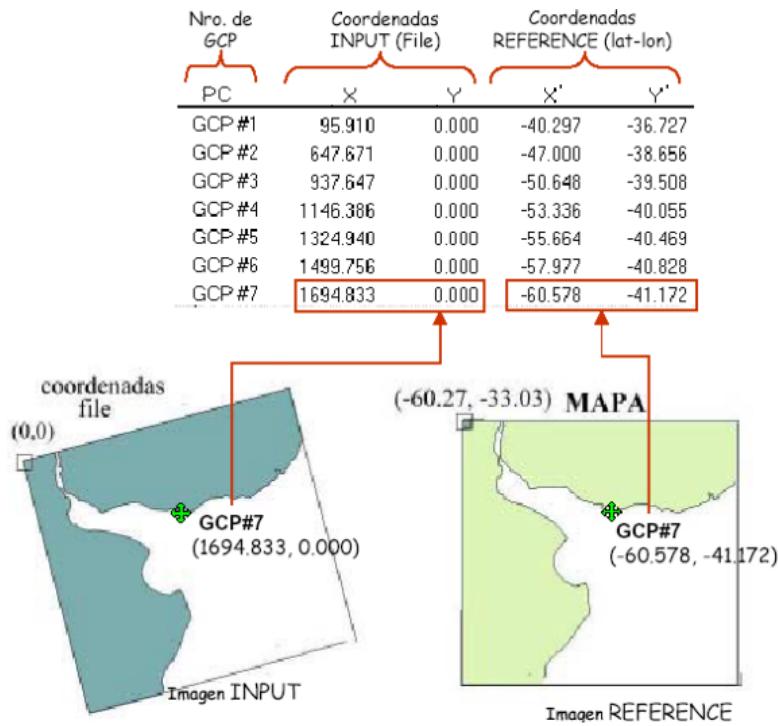


FIGURA 4.6: Levantamiento de puntos de control.

La ecuación de transformación es una regresión que relaciona los valores de coordenadas pertenecientes a la imagen, con las coordenadas cartográficas. Los coeficientes de transformación se obtienen a partir de los puntos de control seleccionados, aplicando un ajuste por mínimos cuadrados de todos los puntos (ver sección 3.6.1.1.2). Cuando la contribución de los puntos al *RMS* es alta, significa que las correspondencias de puntos están mal seleccionada y que no corresponden al modelo de transformación entre la imagen y la referencia. Por ello se tiene un umbral donde los puntos que sobrepasan son borrados, re-calculando el RMS. En nuestro modelo utilizaremos 0,5 píxel de la imagen, como umbral. La redundancia de datos hará que la bondad de ajuste tenga significación estadísticas y proporcione una mayor fiabilidad. La regresión para esta metodología es lineal.

La última fase en la corrección geométrica consiste en la interpolación radiométrica,

donde se lleva a cabo el re-muestreo de los píxeles a una nueva posición utilizando el método de convolución cúbica (seleccionada por su mayor precisión).

El Algoritmo 1 presenta el pseudo-código de la corrección geométrica.

Algoritmo 1 Algoritmo de corrección geométrica

requiere: Puntos de control $pc = (x', y', x, y)$ y la banda i de la imagen satelital

```

1: Función CORRECIONGEOMETRICA( $pc, i$ )
2:    $a \leftarrow$  vector de coeficientes para la axisa
3:    $b \leftarrow$  vector de coeficientes para la ordenada
4:    $i' \leftarrow$  Imagen corregida
5:
6:   //Para el calculo de mínimos cuadrados ver sección 3.6.1.1.2
7:   AJUSTEPORMÍNIMOSCUADRADOSRMS( $pc, a, b$ )
8:
9:   para  $x \leftarrow 0, m$  hacer
10:    para  $y \leftarrow 0, n$  hacer
11:      TRANSFORMACIÓN( $x, y, a, b, i, i'$ )
12:    fin para
13:  fin para
14:  retornar  $i'$ 
14: fin Función
15:
16:
17: Procedimiento TRANSFORMACION( $x, y, a, b, i, i'$ )
18:    $x' = a[0] + a[1].x + a[2].y$ 
19:    $y' = b[0] + b[1].x + b[2].y$ 
20:    $i'[x'][y'] =$  CONVOLUCIÓNCÚBICA( $x', y', x, y, i$ )
21: fin Procedimiento

```

4.2.1.2. Corrección Radiométrica

El bandeo y los pixeles perdidos causados por factores naturales y del sensor podrían generar errores en el momento de aplicar operaciones del álgebra de mapas a las imágenes satelitales. Por ello, en este proceso se plantea realizar la correcciones radiométricas a las imágenes satelitales aplicando los métodos de bandeo y pixel o lineas perdidas descriptos en la sección 3.6.2.2 y 3.6.2.1.

4.2.2. Detección de cambio forestal

La detección de cambio cumple un papel fundamental en la metodología, ya que nos permite categorizar el cambio en las series temporales estudiadas. Este proceso presenta un sistema automatizado a través de cálculos estadísticos extraído de las imágenes satelitales para detectar el cambio (sección 3.7.3.1) y a partir de previos análisis del comportamiento espectral observados en la cobertura vegetal (sección 5.3.1) evaluar los cambios forestales.

4.2.2.1. Detección de cambio

En este proceso se detecta el cambio entre dos tiempos de imágenes satelitales. El resultado esperado constituye una máscara de cambio (*MC*) entre las series temporales de imágenes comparadas. La Figura 4.7 presenta un panorama específico de lo que se busca en el proceso

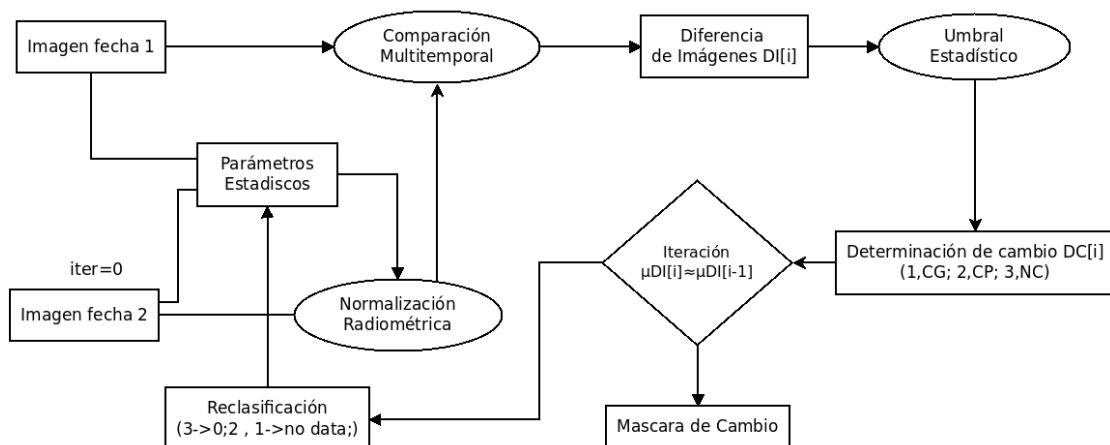


FIGURA 4.7: Diagrama de flujo. Detección de Cambio.

4.2.2.1.1. Comparación Multitemporal

El siguiente paso después de haber equiparado radiométricamente (sección 3.7.1) las imágenes consiste en la comparación multitemporal, permitiendo obtener un índice de cambio (variable cuantitativa) en cada pixel resultante. El método de diferencia de imágenes es utilizada debido a que el método Ratio no se ajusta a una distribución

normal, se asume que el cambio es reducido y por ende están ubicados hacia los extremos del histograma de la imagen con los índices de cambio I_c , condición clave para la umbralización estadística. La comparación es realizado sobre la imagen con los NDVI de cada serie temporal a modo a resaltar la vegetación y simplificar la cantidad de bandas utilizadas, observando a su vez que los datos estables serán próximos a 0 gracias a la semejanza existente entre los píxeles.

4.2.2.1.2. Umbral estadístico

Los criterios de decisión propuesto en la sección 3.7.3.1 asignan valores de cambio/no cambio en función a un umbral. Estos criterios permiten convertir los índices de cambios a valores cualitativos que representan una máscara de cambio (MC). El método basados en parámetros estadísticos es escogido por su sencillez y coherencia con el método de comparación multitemporal aplicada.

La imagen es re-clasificadas en distintas categorías mediante los umbrales calculados (Perdida=2, Ganancia=1, No cambio=3), como podemos ver en la Figura 4.8. La variable de fiabilidad n es elegida en base a la probabilidad de cambio deseado para la detección (más detalles en la sección 3.7.3.1).

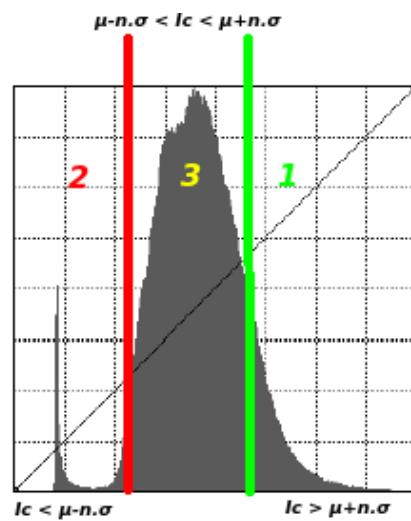


FIGURA 4.8: Umbrales y valores cualitativas asignadas en cada categoría (Perdida=2, Ganancia=1, No cambio=3).

4.2.2.1.3. Iteración

Si dos imágenes se consideran semejantes, los cambios producidos en el terreno afectan a la radiometría registrada en las imágenes, y por tanto, en los parámetros estadísticos que las definen.

En la normalización radiométrica los cambios introducen ruido [MG13]. Si la superficie de cambio es mayor, la influencia en la normalización será mayor y por ende afectara la precisión en la detección de cambios. En vista al problema, mediante una normalización radiométrica iterativa se pretende minimizar dicha influencia, donde los parámetros estadísticos utilizados constituyen los pixeles sin cambios.

En la Figura 4.9 podemos observar que a partir de la mascara de cambio obtenido en la primera iteración, los parámetros estadísticos para la iteracion 2, en la normalización iterativa, son realizados sobre los pixeles que no detectaron cambios.

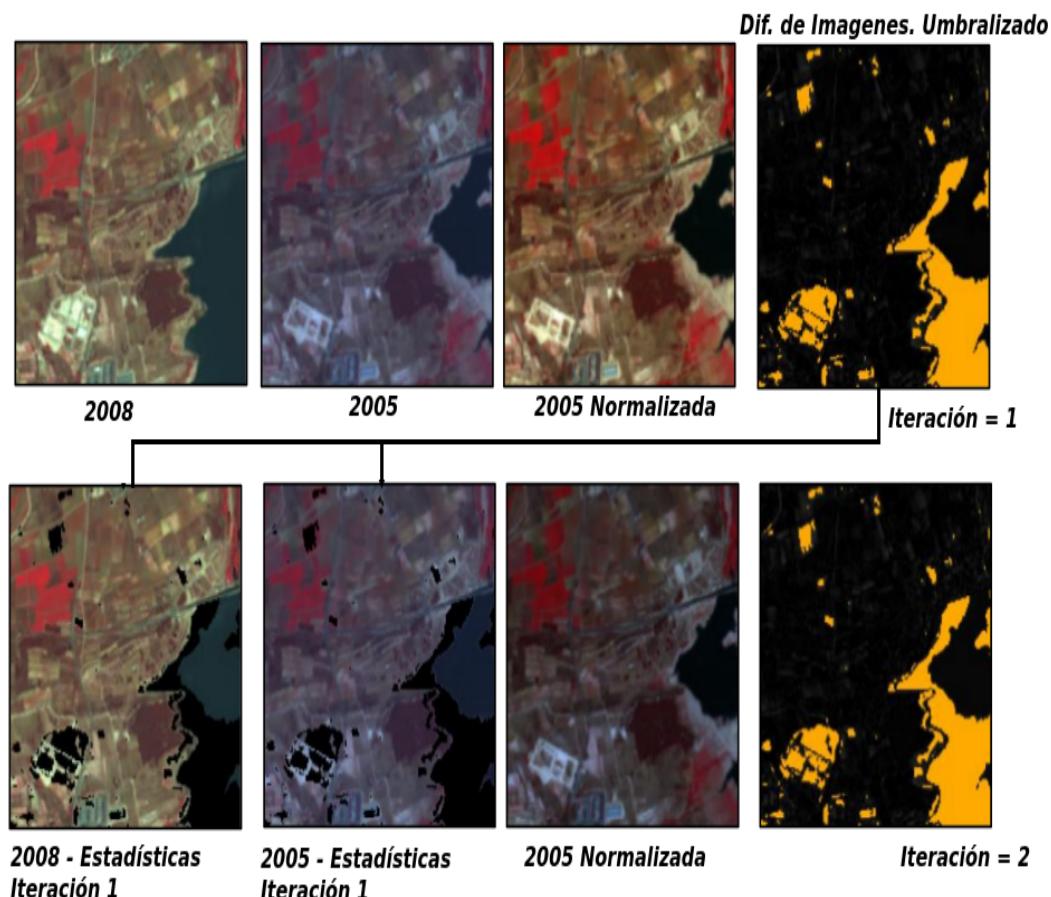


FIGURA 4.9: Mascaras de cambio, iteración de la normalización radiométrica.

En la máscara de cambios generada por la detección de cambios (MC), las celdas clasificadas como cambios ($ND = 2$; $ND = 1$), son re-clasificadas como $ND = 0$; frente a las celdas de no cambio ($ND = 3$), clasificadas con $ND = 1$. Esta máscara re-clasificada se utiliza para suprimir los cambios de las imágenes radiométricas utilizadas como referencia estadística. El procedimiento anterior se aplica únicamente para estimar los parámetros de normalización radiométrica. La imagen sobre la que se aplica la normalización ha de mantener todas las celdas, independientemente de que se consideren como cambios a priori. Las iteraciones son repetidas hasta que la media de las diferencias entre NDVI sea de magnitud similar a la media obtenida en la iteración anterior. El siguiente Algoritmo 2 nos muestra como la iteración es hecha.

Algoritmo 2 Algoritmo de iteración

```

1:  $i_1 \leftarrow$  imagen de la fecha 1
2:  $i_2 \leftarrow$  imagen de la fecha 2
3:  $MC \leftarrow$  máscara de cambio
4:  $i^{Norm} \leftarrow$  imagen normalizada
5:  $bandera = 0$ 
6:
7:  $continuar = 1$ 
8:  $primera = 1$ 
9: mientras  $continuar = 1$  hacer
10:    $MC = NORMALIZAR(MC, i_1, i_2, i^{Norm})$ 
11:   si  $primera = 1$  or  $i^{Norm}.media <> bandera$  luego
12:      $continuar = 1$ 
13:      $primera = 0$ 
14:      $bandera = i^{Norm}.media$ 
15:   sino
16:      $continuar = 0$ 
17:   fin si
18: fin mientras
  
```

4.2.2.2. Discriminación Forestal

La siguiente Figura 4.10 refleja los pasos realizados para obtener una máscara de vegetación. Dicha máscara representa si un pixel es o fue vegetación forestal en la serie temporal comparada. Los imágenes de entrada que serán procesadas son aquellas obtenidas en la ultima normalización radiométrica generada por el proceso iterativo y la imagen base para la semejanza en ese proceso.

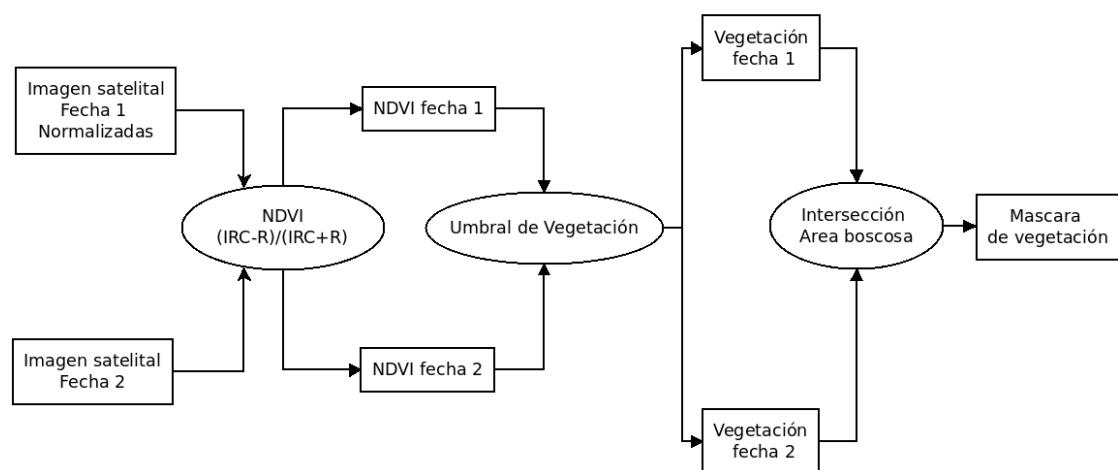


FIGURA 4.10: Diagrama de flujo. Discriminación Forestal.

4.2.2.2.1. NDVI

El NDVI es calculado para ambas fechas pertenecientes a la serie temporal evaluada. El cálculo es hecho teniendo como entradas las bandas infrarroja cercana y roja, donde el vigor vegetal de cada píxel será determinado por la ecuación 3.2. En total son consumidas 4 imágenes para obtener dos de salidas.

4.2.2.2.2. Umbral de Vegetación

El umbral que discrimina la vegetación es determinado a partir de una constante calculada por un previo análisis del comportamiento espectral de la cobertura vegetal y las imágenes de NDVI. Dicha variable corresponde a la desviación ($\sigma_c = 0,0658242733$) observada en la intersección entre imágenes VCF y Landsat (más detalles en la sección

5.3.1). La ecuación del umbral U_{NDVI} tiene la siguiente expresión:

$$U_{NDVI} = \mu_{NDVI} \pm n \times \sigma_c \quad (4.1)$$

Donde μ_{NDVI} representa la media del NDVI calculada y n la fiabilidad. La ecuación correspondiente a la suma no es utilizada debido a que se pretende incluir índices por debajo de la media. En la Figura 4.11 podemos observar que el umbral del NDVI se situá por debajo de la media.

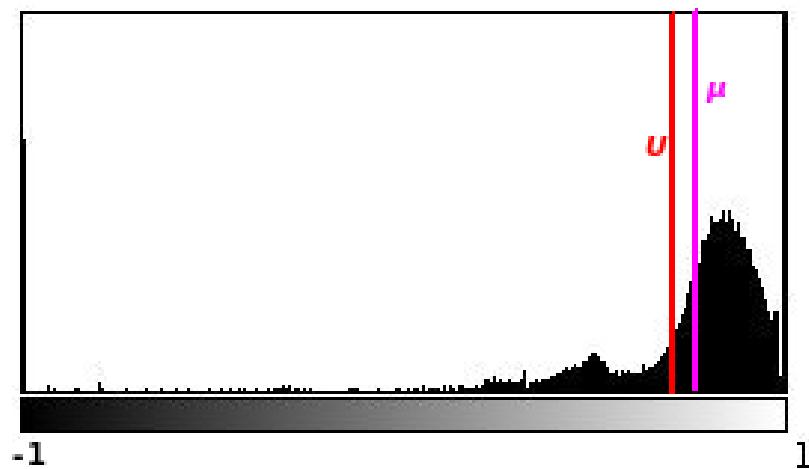


FIGURA 4.11: Umbral NDVI y la media en el histograma de la imagen con NDVI.

4.2.2.2.3. Intersección área boscosa

El procedimiento que sigue una vez obtenido los NDVI de las dos fechas es determinar los pixeles que serán evaluados para detectar el cambio, por ello aplicamos una simple operación de unión ($ndvi_1 \text{ OR } ndvi_2$) que generara una mascara de vegetación MV correspondiente a los dos tiempos.

4.2.2.3. Mascara de Pérdida Forestal

El proceso consiste en la intersección entre la mascaras de vegetación y cambio (MC AND MV). En la intersección solo son considerados los cambios correspondiente a pérdidas en MC , debido a que se pretende generar una imagen binaria MP que represente si en un pixel hay pérdida forestal.

La imagen *MP* probablemente tendrá errores que son inherentes a los procesos utilizados para su creación [LG01].

La utilización del filtro de mediana sobre la imagen de perdida en la reducción del porcentaje de falsas alarmas será utilizado como método para la eliminación de ruido. Con imágenes de media/alta resolución espacial(menos de 15×15 metros cuadrados) se obtienen buenos resultados aplicando filtros de 5×5 , pero cuando se trabaje con imágenes de menor resolución no se recomienda ese tamaño de ventana por la distorsión que causa a la imagen [MG13]. Nuestras imágenes satelitales de entrada son de baja resolución espacial (30×30 metros cuadrados) por lo que el tamaño de ventana a utilizar sería 3×3 . En la Figura 4.12 podemos observar el flujo de tareas para la obtención de la máscara que representa la perdida forestal en dos tiempos .

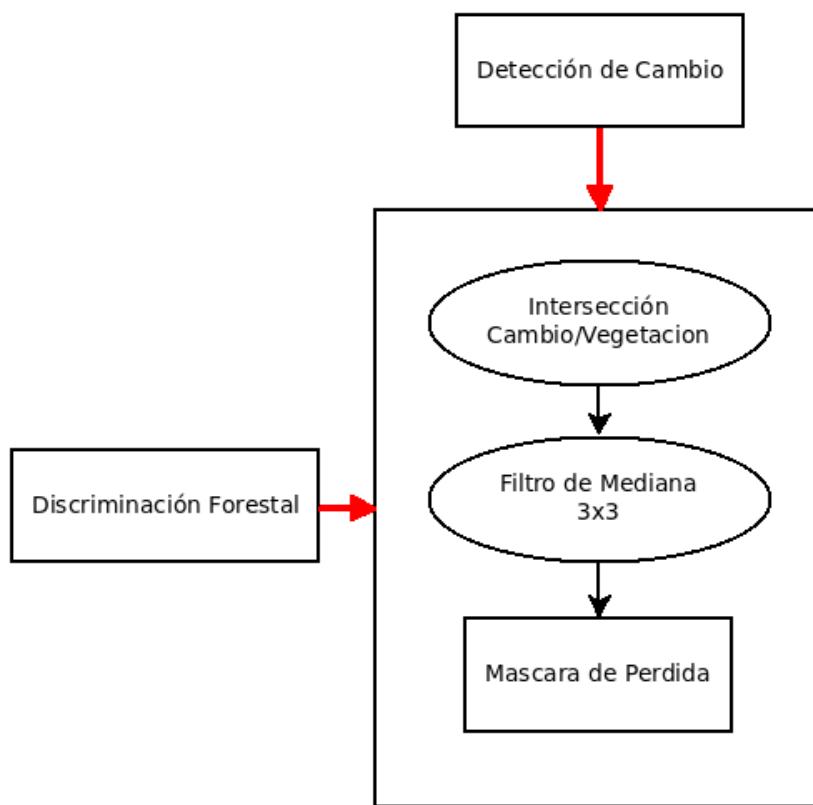


FIGURA 4.12: Diagrama de procedimientos para la obtención de la máscara de perdida forestal.

4.2.3. Estimación de pérdida de carbono forestal

El procedimiento final en la metodología consiste en estimar el carbono perdido o no secuestrados dentro del tiempo transcurrido entre las imágenes satelitales. El producto constituye la máscara de pérdida forestal junto con la cuantificación en toneladas de carbono por hectárea obtenida mediante la ecuación de regresión lineal ($y = b + a \times x$). La ecuación de regresión fue generada a través del mapa global de carbono [SHB⁺¹¹] y el NDVI, determinadas por las imágenes Landsat, en un análisis previo (más detalles en la sección 5.3.2). La regresión presenta un coeficiente de determinación moderado ($r^2 = 0,509125$), según la tabla 4.3, por lo que es considerada su aplicación en la metodología.

Valor	Significado
0,0	Ninguna Relación
0,25	Relación baja
0,50	Relación Moderada
0,75	Relación Buena
1,00	Relación perfecta

TABLA 4.3: Rangos del coeficiente de determinación.

Sea $C : (x, y) \rightarrow \{[-\infty, \infty]\}$ la cantidad de carbono, en toneladas por hectárea, para la coordenada (x, y) , se tiene que:

$$C(x, y) = 4,33 + 30,1 \times ndvi(x, y) \quad (4.2)$$

La estimación de carbono para dos fechas en función al ndvi ($ndvi_1, ndvi_2$) queda definida de la siguiente manera:

$$C_1(x, y) = 4,33 + 30,1 \times ndvi_1(x, y) \quad (4.3)$$

$$C_2(x, y) = 4,33 + 30,1 \times ndvi_2(x, y) \quad (4.4)$$

El cálculo de perdida de carbono en las fechas consistiría básicamente en: $\sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n C_2(x, y) - \sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n C_1(x, y)$. Pero sabiendo que:

$$Ic(x, y) = ndvi_2(x, y) - ndvi_1(x, y) \quad (4.5)$$

Podríamos restar la ecuación 4.4 y 4.3, tendríamos:

$$C_2(x, y) - C_1(x, y) = 30,1 \times (ndvi_2(x, y) - ndvi_1(x, y)) \quad (4.6)$$

$$PC(x, y) = C_2(x, y) - C_1(x, y) \quad (4.7)$$

Siendo $PC(x, y)$ toneladas de carbono por hectárea perdidos. Remplazando 4.5 y 4.7 en 4.6, la ecuación de regresión final quedaría:

$$PC(x, y) = 30,1 \times Ic(x, y) \quad (4.8)$$

La cuantificación sera realizado teniendo en cuenta la mascara de perdida forestal. La Figura 4.13 nos muestra el resultado esperado por la metodología (Mascara de perdida Forestal y cuantificación).

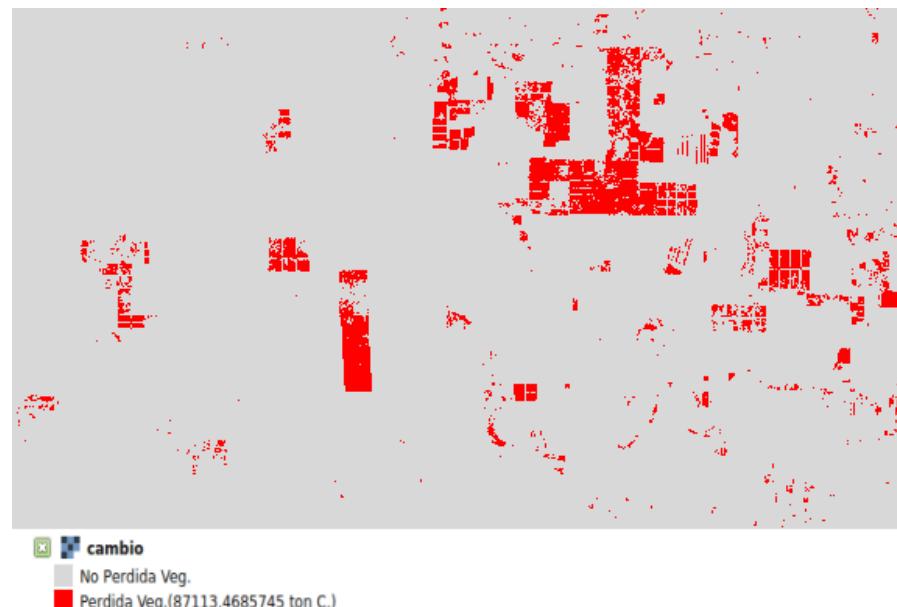


FIGURA 4.13: Presentación del resultado. Mascara de perdida Forestal y cuantificación.

4.3. Resumen

En este capítulo se describen los materiales y los tres procedimientos generales que componen la metodología propuesta. La imágenes infrarroja cercana y roja de las dos fechas inicialmente deben pasar por un proceso de corrección de errores del sensor y de ubicación geográfica para realizar el análisis multitemporal en la detección de cambio forestal. Una vez detectado la perdida forestal entre las fechas del proceso de detección de cambio, se realiza la estimación de carbono en base a una ecuación de regresión hallado por un estudio previo. El resultado consiste en un mapa de perdida forestal junto a la cuantificación en toneladas de carbono perdidos.

Capítulo 5

Pruebas experimentales

En este capítulo se menciona las métricas de evaluación utilizadas para medir el desempeño en la metodología propuesta. Por otro lado, se detallan los experimentos realizados y los resultados obtenidos, seguidamente se esboza la comparación y la posterior discusión de los mismos.

5.1. Caso de estudio

Filadelfia es una ciudad de Paraguay, del departamento de Boquerón, del Chaco paraguayo (lat-long $22^{\circ}20'00''S - 60^{\circ}01'00''O$) con una superficie de $13.879\ km^2$. Fue elevada a nivel de distrito en 2006. Su población la constituyen principalmente colonos menonitas. Fundada junto a otras localidades menonitas a finales de la década de 1920, ha desarrollado una cultura específica, transmitida a lo largo de los siglos a través de la religión, y una infraestructura productiva que le aporta a sus residentes alto poder de compra. Estas comunidades menonitas trabajan con modernas técnicas de producción agropecuaria, fabricación de productos lácteos y procesamiento de sésamo y maní. Pueden ser ubicadas dentro de las imágenes landsat con path-Row 228-76 y en las VCF con código KJ1920.

La localización descripta, fue elegida debido a que ademas de estar ubicada en el Chaco Paraguayo posee un crecimiento demográfico en la que las actividades agrícolas y ganaderas son variantes, proporcionando un ambiente ideal para las distintas pruebas y

validaciones necesarias.

5.2. Métricas de evaluación

En el control de calidad, algunos se basan en el concepto de matriz de confusión, que establece una relación entre los resultados obtenidos en el proceso de asignación y la información verdad terreno (VT) disponible para la zona de estudio. La diagonal principal representa el número de celdas correctamente catalogadas (T), y la diagonal transpuesta, las incorrectamente catalogadas (F). El uso de esta matriz presenta como mayor desventaja que está condicionada a la veracidad y exactitud de la referencia utilizada como VT .

Categorías	Perdida (VT)	No Perdida (VT)	Total (VT)
Perdida (Algoritmo)	TP	FP	P
No Perdida (Algoritmo)	FN	TN	N
Total (Algoritmo)	P'	N'	Total

TABLA 5.1: Matriz de Confusión

Esta matriz de confusión, permite extraer distintos parámetros que evalúen la calidad del resultado obtenido en un proceso de detección de cambios utilizando técnicas de teledetección. A continuación se explican los dos parámetros más utilizados para este propósito: el porcentaje de precisión global y el coeficiente Kappa. Estas medidas de la precisión se han utilizado para evaluar diferentes métodos de detección de cambio[Foo02].

5.2.1. Porcentaje de precisión global

El porcentaje de precisión global (Global Acurrancy, GA) se define como la suma del número de celdas clasificadas correctamente y dividiendo por el número total de celdas que componen el área de referencia que representa la verdad terreno. Foody [Foo02] considera óptimo cualquier resultado a partir de un 85 de precisión global. Seguidamente

se muestra la expresión matemática de la precisión global.

$$GA = \frac{TP + TN}{T + F} \cdot 100 \quad (5.1)$$

5.2.2. Coeficiente Kappa

El coeficiente Kappa es otro indicador utilizado frecuentemente en un proceso de teledetección, en la fase correspondiente al control de calidad de los resultados [Chu98]. Este índice es una medida de la correspondencia entre los resultados de la detección de cambios y los datos verdad-terreno tomados como referencia, en relación a la exactitud de una variable aleatoria, en otras palabras, es una medida estadística que ajusta el efecto del azar en la proporción de la concordancia observada para elementos cualitativos (variables categóricas).

Según se indica en Jensen [Jen81], en detección de cambios en zonas urbanas es más apropiado utilizar el coeficiente Kappa, puesto que hace uso de toda la matriz de error.

$$KAPPA = \frac{\text{Total}.(TP + TN) - (P.P' + N.N')}{\text{Total}^2.(P.P' + N.N')} \cdot 100 \quad (5.2)$$

Coeficiente Kappa	Fuerza de la concordancia
0,00	Pobre
0,01-0,20	Leve
0,21-0,40	Aceptable
0,41-0,60	Moderada
0,61-80	Considerable
0,81-1,00	Casi perfecta

TABLA 5.2: Valoración del coeficiente kappa[LK77].

5.3. Pruebas y resultados experimentales

En esta sección se describirán las diferentes pruebas desarrolladas para la determinación de constantes establecidas dentro de los proceso metodológicos. Igualmente se exponen

los resultados obtenidos por la metodología empleado en el estado del arte, de manera a evaluar los datos de salida a través de métricas de evaluación.

5.3.1. Umbral de Vegetación

En la metodología hemos hablado y utilizado una variable estadística [4.2.2.2.2](#) hallada por un análisis previo del comportamiento espectral que presenta la cobertura vegetal. Dicha variable corresponde a la desviación.

Partiendo del las imágenes VCF [4.1.1.2](#) junto con las imágenes Landsat [4.1.1.1](#), se elaboro un cruzamiento de datos. En las imágenes VCF, los píxeles representan proporciones de vegetación existente en un espacio geográfico, mientras que las imágenes Landsat nos permite calcular NDVI. Se procedió a la obtención y calculo del NDVI en diferentes tiempos (1986, 1990, 2000) teniendo como referencia la fecha de la imagen VCF. Existe una colección disponible de imágenes VCF, del año 2000 hasta el 2010, en la que se tomo el año 2000 como referencia, por observar mayor porcentaje de cobertura vegetal que las demás. Una vez obtenidos los NDVI de cada fecha, se elaboro mascaras de la imagen VCF, en la que representaba existencia de vegetación para cada rango de porcentaje. Los rangos varían de 0-10, 0-20, 0-30, 0-40 y 0-50, no se analizaron en el rango completo debido a lo no existencia de píxeles con los valores.

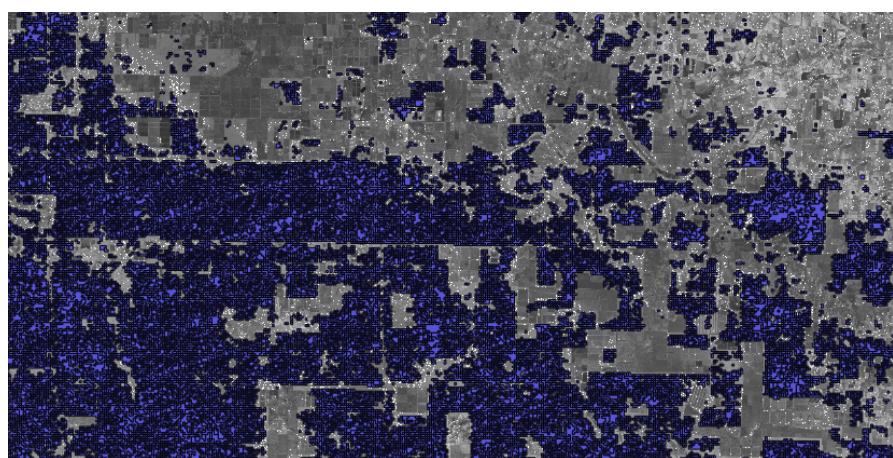


FIGURA 5.1: Mascara VCF de 0-30 % sobre NDVI año 2000

Posteriormente se extrajeron 2000 puntos aleatorios, para muestreo, de la mascara VCF, donde estaran los valores de NDVI..

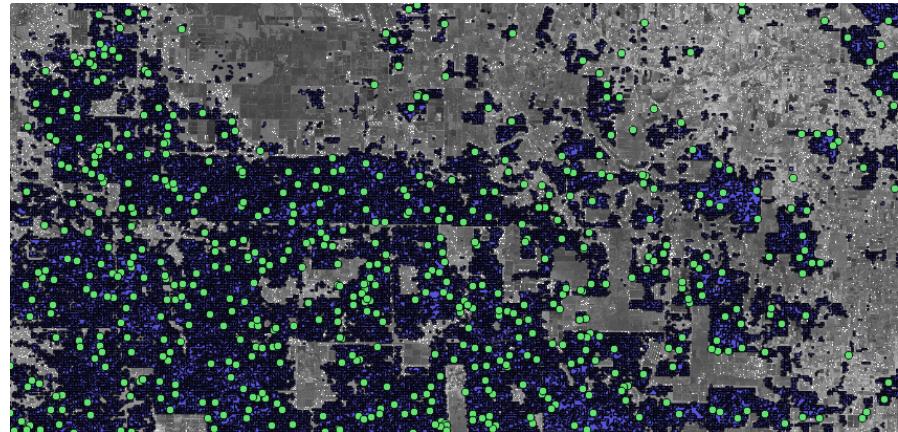


FIGURA 5.2: Puntos aleatorios dentro de la mascara VCF.

El procedimiento se repite para cada mascara en los distintos rangos. En total se obtiene 5 grupos por cada año estudiado con estadísticas ilustrada en la tabla 5.3.

Año 1986		
VCF (%)	NDVI (Media)	NDVI (Desviación)
50	0.356701	0.047891
40	0.344022	0.0507296
30	0.337696	0.061581
20	0.339586	0.0632055
10	0.335528	0.0727573
Año 1990		
VCF (%)	NDVI (Media)	NDVI (Desviación)
50	0.278804	0.0631834
40	0.264651	0.0679451
30	0.254145	0.0742348
20	0.252186	0.0759032
10	0.251421	0.0796667
Año 1990		
VCF (%)	NDVI (Media)	NDVI (Desviación)
50	0.0202133	0.0572825
40	0.0104289	0.0608757
30	-0.00337075	0.066776
20	-0.00663188	0.0695777
10	-0.0103891	0.0757546

TABLA 5.3: Media y desviación del muestreo realizado.

La tabla nos muestra claramente, que la media del NDVI es diferente para cada año, independientemente del porcentaje de vegetación evaluado. En este caso, no es conveniente tomar la media dentro de un patrón de comportamiento, con el fin de discriminar la vegetación. Por otro lado, las desviaciones presentan pequeñas diferencias no considerables, lo cual es debido, a que el área foliar (hojas) en la vegetación posee diferente vigor en cada estación o condición climática, al momento de ser capturado su reflectividad por sensores del satélite.

De esta manera se realiza un promedio entre todas las desviaciones, quedando como valor constante en la umbralización de vegetación $\sigma_c = 0,0658242733$.

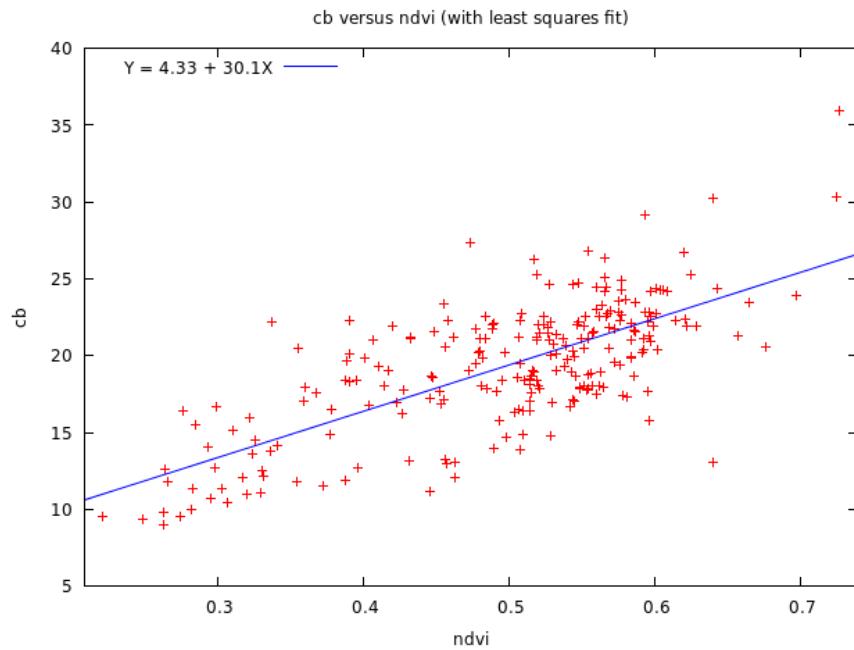
5.3.2. Estimación de pérdida de carbono forestal

Gracias al Mapa Global de Carbono 4.1.1.3 es posible analizar la relación que posee con los índices de vegetación. El mapa corresponde a fechas cercanas al año 2000, por lo que para el estudio, se obtuvieron imágenes Landsat del año 2003 para el cálculo de NDVI. Posteriormente se generaron 240 puntos aleatorios dentro áreas que correspondían a vegetación.

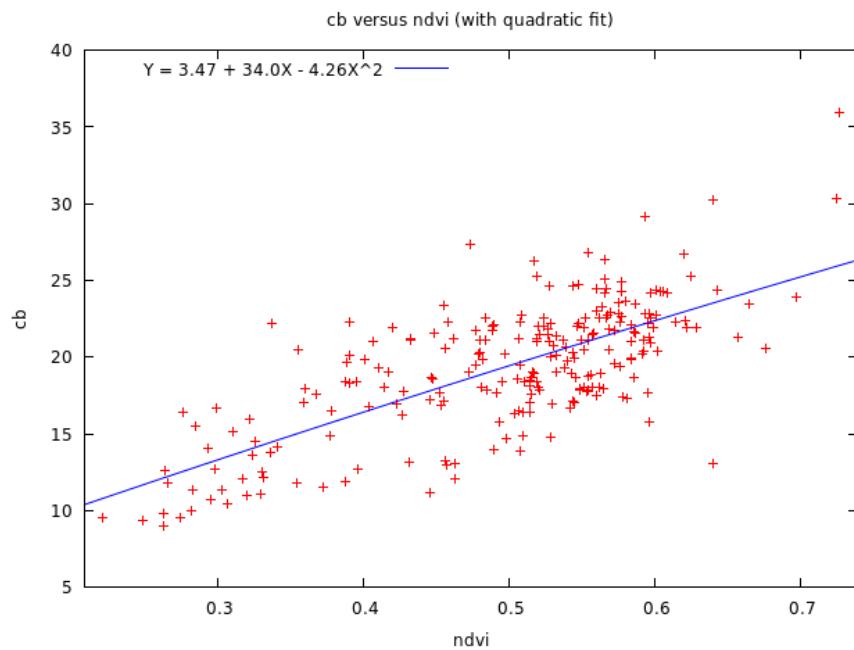


FIGURA 5.3: Puntos aleatorios.

Estos puntos fueron generados para interceptar en ellos, los NDVI y ton C/ha en el espacio geográfico. De esa manera nos permitió realizar un análisis de regresión. Inicialmente se halló una ecuación lineal, donde el coeficiente de determinación fue moderado ($r^2 = 0,509125$).

FIGURA 5.4: Regresión Lineal. $X = NDVI, Y = TonC/ha$

En la misma forma se construye una ecuación cuadrática, pero el coeficiente de determinación era semejante al lineal $r^2 = 0,509273$.

FIGURA 5.5: Regresión cuadrática. $X = NDVI, Y = TonC/ha$

De esta manera, se opta por la ecuación lineal para el calculo de carbono en función al NDVI:

$$C = 4,33 + 30,1NDVI \quad (5.3)$$

Siendo C toneladas de carbono por hectárea.

5.3.3. Prueba experimental

Con el propósito de evaluar la calidad en la detección de cambio, se obtuvieron las imágenes que fueron utilizadas en la elaboración del Paraguay Forest Change Product 4.1.1.4. Dichas imágenes corresponden a la fecha 1-26-1992 del satélite Landsat-5 y 8-17-1999 del satelite Landsat-7, con path-row 228-76 del WRS-2 cubriendo al área del caso de estudio.

Se delimitaron 3 tipos de áreas, donde cada uno representa un sector relacionado al uso del suelo. Esto es con el fin de evaluar la detección en diferentes condiciones:

- **Área Urbana:** zona de aglomeramiento y mayor densidad poblacional. Existe predominio de actividades económicas no agropecuarias, sumado a la población total.
- **Área Rural:** se caracteriza por la inmensidad de espacios verdes que la componen y que por esta razón está destinada y es utilizada para la realización de actividades agropecuarias y agro-industriales, entre otras.
- **Área Húmeda:** zona de tierras, generalmente planas, cuya superficie se inunda de manera permanente o intermitente-mente.

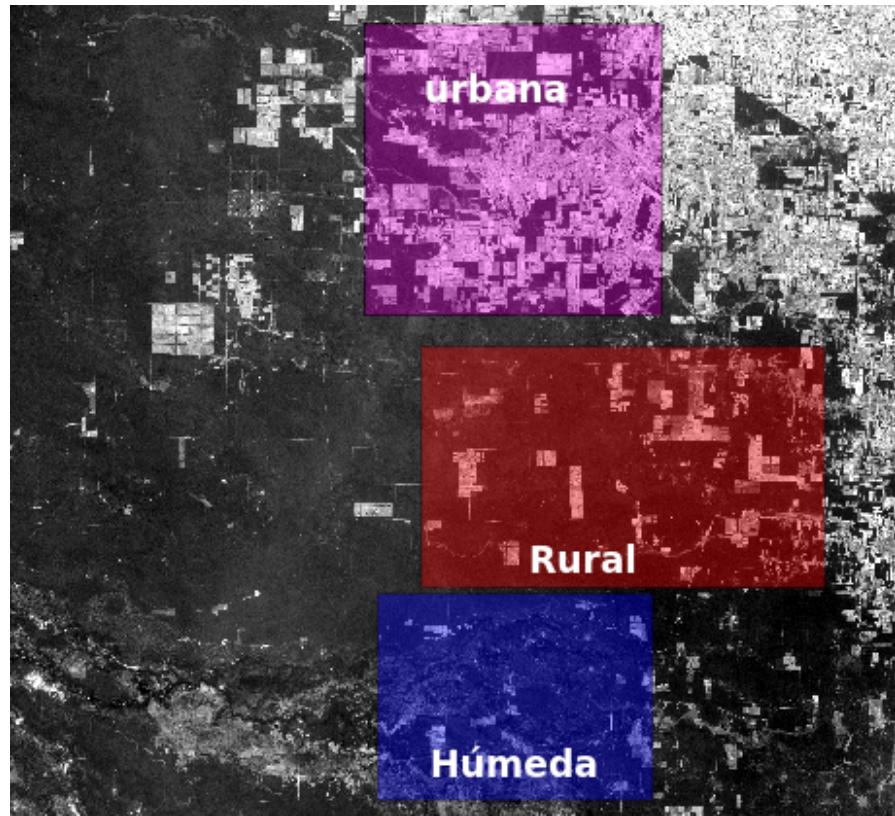


FIGURA 5.6: Sectores de estudio.

Sector	xMin	yMin	xMax	yMax	Has.	Km.
Urbano	748797.48	-2532113.76	799869.96	-2482116.50	255348.41	202.13
Rural	758474.37	-2578885.40	827825.42	-2537489.81	287082.72	221.49
Húmedo	750947.90	-2615442.54	798257.14	-2579960.61	167862.32	165.58

TABLA 5.4: Polígono de las áreas. Sistema de coordenadas UTM Zona 20 K.

La metodología fue implementada como un complemento al Quantum GIS ??, de manera a poder realizar las pruebas.

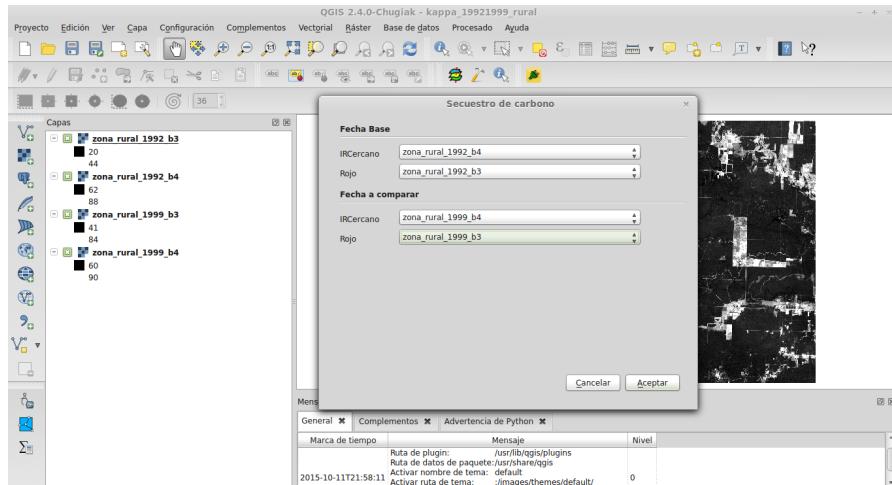


FIGURA 5.7: Complemento Quantum GIS.

El proceso de corrección de las imágenes satelitales [4.2.1](#), debido a que obtuvieron los productos L1T del USGS [4.1.1.1](#), no fueron implementados por ya poseer el preprocesamiento de corrección geométrica y radiométrica correspondiente. Esto es beneficioso al estudio en cuanto a costo, por no ser necesario el levantamiento de los puntos de control (GCP) en el terreno para la corrección geométrica específicamente. La interpolación espacial fue hecha por un polinomio cuadrático y la radiométrica por el método de convolución cubica.

Satélite	Path-row	Fecha	RMSE	GCP
Landsat-5	228-76	1-26-199	4.302	108
Landsat-7	229-76	8-17-1999	4.066	199

TABLA 5.5: RMSE obtenido del meta-dato de cada imagen obtenida.

Se recortaron las bandas de las imágenes, infrarroja cercana y roja ($B4, B3$), para cada sector y fecha e introducidas como datos de entrada al complemento, ilustración [5.7](#). A continuación se muestran los resultados de cada sector con diferentes coeficientes de tolerancia, descripto en la sección [3.7.3.1](#), luego de pasar por el complemento:

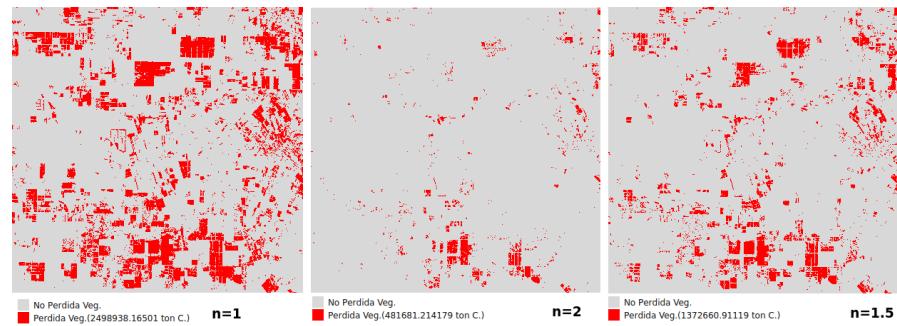


FIGURA 5.8: Área Urbana.

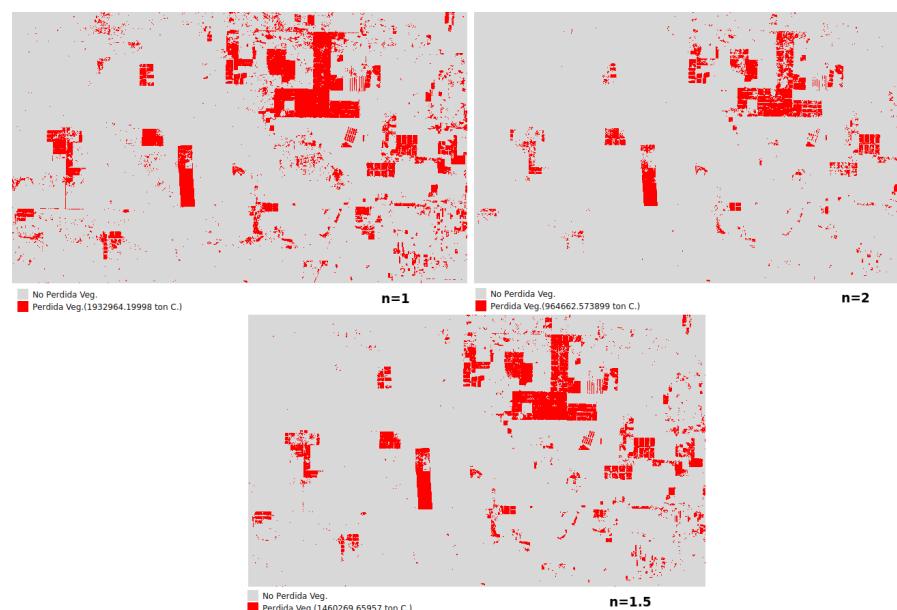


FIGURA 5.9: Área Rural.

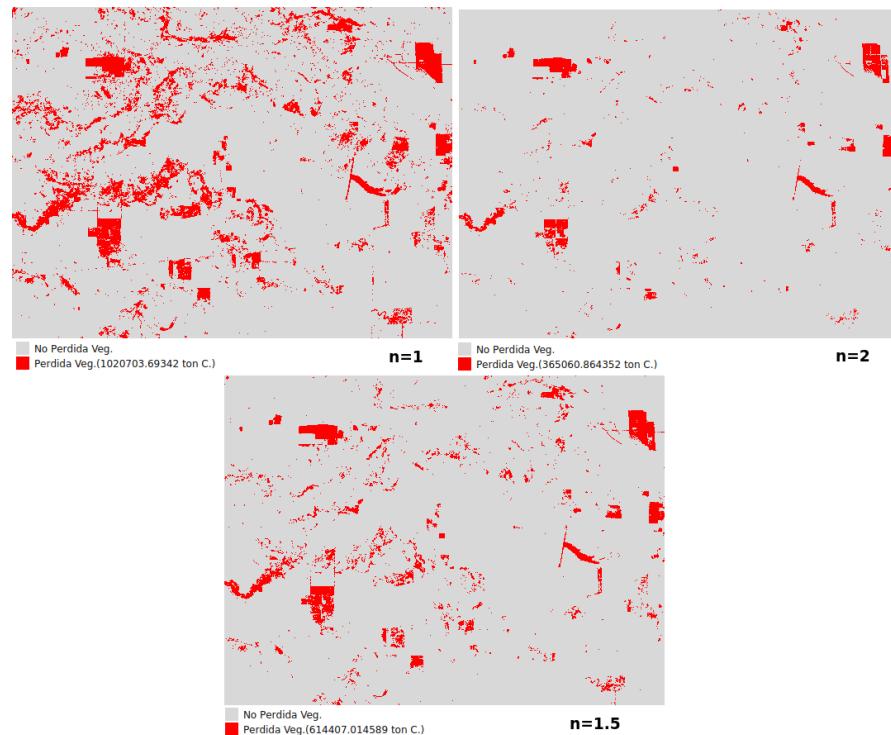


FIGURA 5.10: Área Húmeda.

5.3.4. Discusión de resultados

La evaluación de la calidad en la detección de perdida forestal fueron hechas con la comparación del Paraguay Forest Change Product (PFCP) y los resultados obtenidos por cada sector y coeficiente de tolerancia (n). El indice kappa y la precision Global nos permitira saber la calidad en los resultados de detección de cambio.

Previamente se realizo una re-clasificación en la imagen PFCP, ya que en ella refleja varios tipos de bosques y no bosques, por ello se procedió a dejar solo aquellos pixeles que representan perdida de vegetación en cualquier de los tipos.

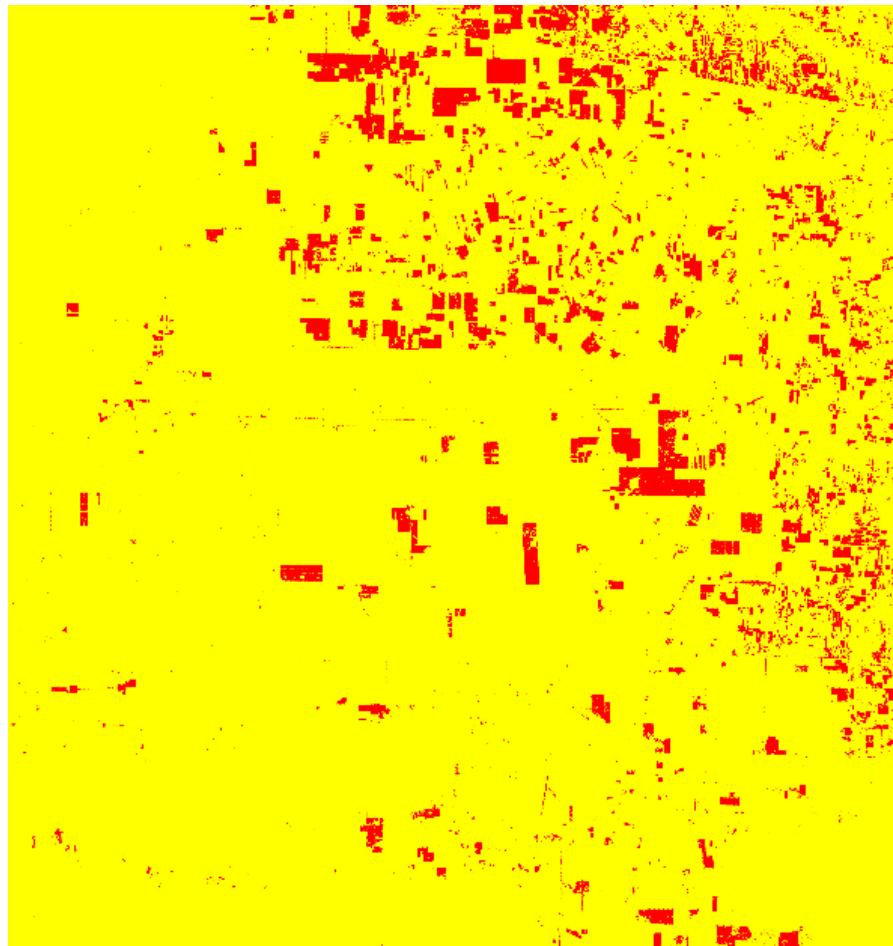


FIGURA 5.11: Re-clasificación de la imagen PFCP. Perdida = 2, Otros=1

Una vez generado la imagen de referencia para la evaluación, con ayuda de la aplicación GRASS GIS ?? se obtuvo los siguientes resultados:

N=1		
Área	Kappa	Precisión Global
Urbano	0.476389	84.257452
Rural	0.65782	93.82121
Húmeda	0.301541	90.624794
N=1.5		
Área	Kappa	Precisión Global
Urbano	0.315273	83.514875
Rural	0.671753	94.899171
Húmeda	0.425555	96.693648
N=2		
Área	Kappa	Precisión Global
Urbano	0.09368	81.642457
Rural	0.570687	94.33648
Húmeda	0.425555	96.693648

TABLA 5.6: Coeficiente Kappa y precisión Global obtenidos.

En la figura 5.12, podemos observar que los coeficientes kappas en todos los n son mejores para zonas rurales, variando en resultados moderados y considerables. Seguido por zonas húmedas, donde $n = 1$ se obtienen resultados aceptables a diferencia de las demás que son moderadas. Por ultimo las zonas urbanos son las que presentan gran variación entre los coeficientes hallados para el, debiendo implementar tolerancia baja ($n = 1$), al modelo de detección, para obtener resultados moderados. Los coeficientes son interpretados según la tabla 5.2.

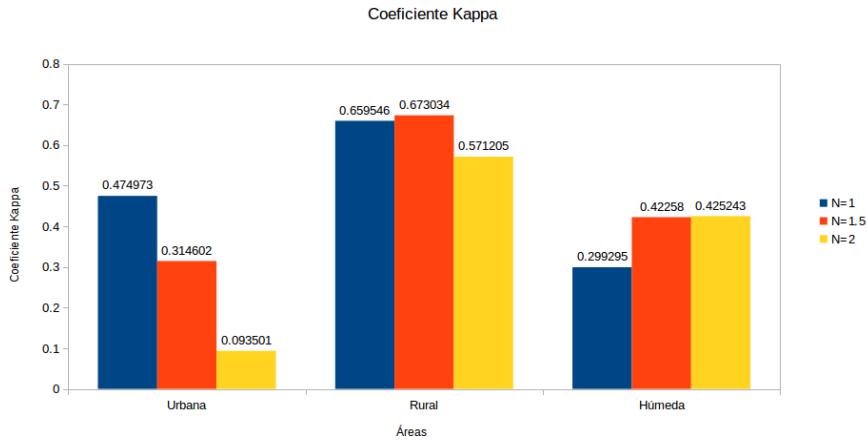


FIGURA 5.12: Coeficiente Kappa por cada Área y tolerancia.

La precisión global, según la ilustración 5.13, nos dice que el mejor resultado fue en la zona húmeda ($n = 2$) bajando el porcentaje para los demás tolerancias. Pero en zonas rurales obtenemos porcentajes parejos y elevados para cualquier n . Tanto para zonas húmedas y rurales seg\xf1n Jensen [Jen81] son óptimos por sobrepasar el 85 %. Las zonas urbanas se encuentran entre 81 % - 85 % proximos al umbral, lo que los deja sin ning\xffn resultado satisfactorio.

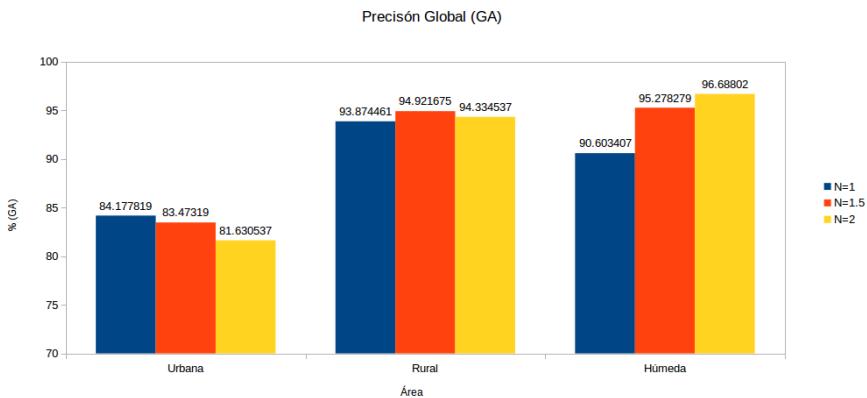


FIGURA 5.13: GA por cada Área y tolerancia.

5.3.5. Dificultades encontradas

Unas de las principales dificultades encontradas fueron en el proceso de corrección geométrica, debido a que es necesario ir al terreno para el levantamiento de puntos de control, sino se utilizan las imágenes Landsat proveídas por USGS 4.1.1.1. Otro punto considerable a lo que se refiere a dificultad, es que las imágenes Landsat presentan

un porcentaje de nubosidad, por lo que requerirá un pre-procesamiento que permita su utilización en el análisis.

Habiendo evaluado los resultados en base a los objetivos propuestos, en el siguiente y último capítulo se exponen las conclusiones de este trabajo y finalmente trabajos futuros que puedan dar continuidad a este trabajo final de grado.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

En base a los resultados obtenidos en la estimación de perdida de carbono en nuestra área de estudio, este capítulo nos presenta las conclusiones y recomendaciones para investigaciones futuras derivadas del trabajo:

6.1. Conclusiones

- Una vez evaluado las diferentes zonas de nuestro caso de estudio, podemos darnos cuenta que la metodología propuesta posee una mejor respuesta, respecto a la calidad, en áreas rurales. Esto es debido a que el Coeficiente kappa o los indices de acuerdo varían entre 0.57-0.67 y su precisión global sobrepasan el umbral optimo de 85 %, para cada coeficiente de tolerancia n . Por lo que se considera satisfactorio la metodología propuesta, ya que la perdida de carbono es un fenómeno frecuente en áreas con vegetación predominante.
- Zonas donde la vegetación no predomina, esta metodología podría no resultar suficientemente conveniente. Las pruebas experimentales hechas en zonas urbanas, la precisión global y el coeficiente kappa no son óptimos por el cual se llega a esa interpretación.
- En áreas cercanas a ríos o sujetas a inundación, se observaron resultados aceptables para estudios con tolerancias medias y altas en la detección de perdida forestal. Por lo que el monitoreo en estos tipos de zonas con la metodología propuesta podría

ser aun de gran utilidad, ya que la presencia de agua en la vegetación modifica la respuesta espectral, dificultando su clasificación como cobertura vegetal.

- Mediante los análisis estadísticos empleados tanto para la determinación de umbrales vegetación/no vegetación como en el hallazgo de ecuaciones de transformación a carbono, nos indica que empleando extracciones de indices vegetales y variables estadísticas es posible generar metodologías no complejas destinadas al monitoreo ambiental. Esta sencillez nos libera de necesarias supervisiones y entrenamientos normalmente empleadas en teledetección.
- El mapa global de carbono [SHB⁺11] constituyó un factor importante para la automatización, al permitir determinar una ecuación que transforme el indice vegetal a carbono. De no existir, hubiese sido necesario aplicar previos muestreos forestales en el terreno.
- La corrección geométrica implica procesos que engloba visitas al terreno para levantamientos de puntos de control requeridas en las interpolaciones. Gracias a la utilización de imágenes Landsat L1T proveídas por la USGS, no fue necesario sumar ese costo a la metodología, automatizando-la por no haber necesidad de realizar dicho procedimiento.

La idea al elegir como caso de estudio parte del chaco paraguayo, es la de actuar de impulsora en la generación de herramientas para el monitoreo ambiental, donde con el empleo de procesamientos digital de imágenes satelitales que conlleven técnicas computacionalmente sencillas y automáticas podamos identificar alertas referentes a perdida en el contenido de carbono forestal. De manera que una vez detectado, a través de las estimaciones, se puedan generar políticas de acción o prevención contra los daños posibles al ambiente. El chaco paraguayo es una región muy afectada actualmente por la degradación y de-forestación en los bosques, donde la falta de recursos y el costo elevado en el monitoreo dificulta las intervenciones a tiempo, constituyendo un caso ideal e impulsora para la aplicación de metodologías como la propuestas en esta investigación.

6.2. Trabajos futuros

Se pretende que la metodología propuesta siga mejorando en términos de pre-procesamiento de las imágenes satelitales, ante factores que influyan en el momento de captura de los datos hechas por sensores remotos como también en técnicas que permita mejora la detección de cambio forestal, por lo que mencionamos como trabajos futuros:

- Proponer técnicas que permitan detectar y eliminar nubosidad en las imágenes satelitales.
- Mejorar la precisión global y el coeficiente kappa para zonas urbanas.
- Diseñar mejores técnicas que clasifique cobertura vegetal mediante la extracción de índices en todas las bandas.
- Adaptar la metodología, de manera a que permita recibir imágenes satelitales con diferentes resoluciones radiométricas.

Bibliografía

- [A⁺08] Arild Angelsen et al. *Moving ahead with REDD: issues, options and implications.* Cifor, 2008.
- [ACRR13] Dolors Armenteras, Edersson Cabrera, Nelly Rodríguez, and Javier Retana. National and regional determinants of tropical deforestation in colombia. *Regional Environmental Change*, 13(6):1181–1193, 2013.
- [ÁJB⁺01] G Ávila, F Jiménez, J Beer, M Gómez, and M Ibrahim. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en costa rica. carbon storage and fixation, and evaluation of environmental services in agroforestry systems in costa rica. *Agroforestería en las Américas (CATIE)*, 8(30):32–35, 2001.
- [AKB⁺05] Gregory P Asner, David E Knapp, Eben N Broadbent, Paulo JC Oliveira, Michael Keller, and Jose N Silva. Selective logging in the brazilian amazon. *Science*, 310(5747):480–482, 2005.
- [Ali10] Dr. Abdulrahman K. Ali. Remote sensing. 1, 2010.
- [AMVMEB⁺03] Miguel Acosta Mireles, Alejandro Velázquez Martínez, Jorge D Etchevers Barra, J Jesús Vargas Hernández, Hugo Ramírez Maldonado, Fabián Islas Gutiérrez, and ; Instituto de Recursos Naturales Programa Forestal. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. *Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México.* PhD thesis, Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México, 2003.

- [BdFM03] Isabel Basualdo, Isabel Gamarra de Fox, and Miguel Angel Morales. *Estrategia nacional y plan de acción para la conservación de la biodiversidad del Paraguay: ENPAB, Estrategia Nacional y Plan de Acción de Biodiversidad, 2004-2009.* Presidencia de la República, Secretaría del Ambiente, 2003.
- [BLMP06] Corey Baker, Rick Lawrence, Clifford Montagne, and Duncan Patten. Mapping wetlands and riparian areas using landsat etm+ imagery and decision-tree-based models. *Wetlands*, 26(2):465–474, 2006.
- [CAGR10] Matthew L Clark, T Mitchell Aide, H Ricardo Grau, and George Riner. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using modis time series data: A case study in the dry chaco ecoregion of south america. *Remote Sensing of Environment*, 114(11):2816–2832, 2010.
- [cal] ¿QUÉ ES EL CALENTAMIENTO GLOBAL? <http://ecopolitica.net/que-es-el-calentamiento-global/>. [Internet; descargado 11-noviembre-2015].
- [Cas03] Benito Bernardo Dzib Castillo. Manejo, secuestro de carbono e ingresos de tres especies forestales de sombra en cafetales de tres regiones contrastantes de costa rica. 2003.
- [cha] Teledetecciónl. <http://laotraopinion.net/tecnologia/teledeteccion/poder-de-resolucion-espectral/>. [Internet; descargado 11-noviembre-2015].
- [Chu98] E Chuvieco. El factor temporal en teledetección: evolución fenomológica y análisis de cambios. *Revista de teledetección*, 10:39–48, 1998.
- [cic] Ciclo del carbono, ¿sabes en qué consiste? <http://www.guioteca.com/educacion-para-ninos/ciclo-del-carbono-sabes-en-que-consiste/>. [Internet; descargado 11-noviembre-2015].
- [com] Composición de colores en las imágenes digitales. http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/i_colreal.htm. [Internet; descargado 16-noviembre-2015].

- [DN] TÉCNICAS DE MUESTREO PARA MANEJADORES DE and RECURSOS NATURALES. El espectro electromagnético. *Blanca*, page 455.
- [Dua12] Gustavo Miguel Huespe Duarte. *Detección de cambios de la cobertura vegetal mediante indices de vegetación (NDVI), dentro y fuera de la Reserva de la biosfera del Chaco en el periodo 1985-2011*. Universidad Nacional de Asunción, 2012.
- [Dur14a] Kris Vanessa Almado Duré. *Estimación de carbono almacenado en el Parque Nacional Defensores del Chaco según formación vegetal mediante imágenes satelitales, año 2014*. Universidad Nacional de Asunción, 2014.
- [Dur14b] Kris Vanessa Almando Dure. *Estimación de carbono almacenado en el Parque Nacional Defensores del Chaco según formación vegetal mediante imágenes satelitales, año 2014*. Universidad Nacional de Asunción, 2014.
- [els] EL SISTEMA DE REFERENCIA MUNDIAL LANDSAT-2 (WRS-2). http://geoinfoven.blogspot.com/2015/01/el-sistema-de-referencia-mundial_16.html. [Internet; descargado 11-noviembre-2015].
- [ERdR04] J Estornell, LA Ruiz, and A del Rey. Análisis metodológico para la detección de cambios urbanos en la ciudad de valencia. *Revista de Teledetección*, 22:55–56, 2004.
- [Esp] Yusmary Espinoza. Secuestro de carbono en el suelo.
- [fao03] Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*, 54, 2003.
- [Foo02] Giles M Foody. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote sensing of environment*, 80(1):185–201, 2002.

- [GBNF07] Holly K Gibbs, Sandra Brown, John O Niles, and Jonathan A Foley. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making redd a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4):045023, 2007.
- [gl215] Global Land Cover Facility. <http://glcf.umd.edu/>, 2015.
- [GMKM⁺87] Apolo Rolando Garcidueñas Martínez, R Keyes, Martínez Menez Michael, R Mario, Zarate Lara, P Guillermo, and ; Programa Forestal. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. *Producción de biomasa y acumulación de nutrientes en un rodal de Pinus montezumae Lamb*. PhD thesis, Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México, 1987.
- [Gon02] RC—Woods Gonzalez. Re: Digital image processing. *Reading, Addison Wesley*, page 88, 2002.
- [GRG⁺13] Clovis Grinand, Féty Rakotomalala, Valéry Gond, Romuald Vaudry, Martial Bernoux, and Ghislain Vieilledent. Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in madagascar from 2000 to 2010 using multi-date landsat satellite images and the random forests classifier. *Remote Sensing of Environment*, 139:68–80, 2013.
- [GS03] M Garzuglia and M Saket. Wood volume and woody biomass. *Food and Agricultural Organization of the United Nations. Roma*, page 30, 2003.
- [Gui99] ERDAS Field Guide. Erdas inc. *Atlanta, Georgia*, 672:94, 1999.
- [GW15] Yingxin Gu and Bruce K Wyllie. Downscaling 250-m modis growing season ndvi based on multiple-date landsat images and data mining approaches. *Remote Sensing*, 7(4):3489–3506, 2015.
- [HBH⁺12] Nancy L Harris, Sandra Brown, Stephen C Hagen, Sassan S Saatchi, Silvia Petrova, William Salas, Matthew C Hansen, Peter V Potapov, and Alexander Lotsch. Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. *Science*, 336(6088):1573–1576, 2012.
- [HKS⁺09] Chengquan Huang, Sunghee Kim, Kuan Song, John RG Townshend, Paul Davis, Alice Altstatt, Oscar Rodas, Alberto Yanosky, Rob Clay,

- Compton J Tucker, et al. Assessment of paraguay's forest cover change using landsat observations. *Global and Planetary Change*, 67(1):1–12, 2009.
- [Jen81] John R Jensen. Urban change detection mapping using landsat digital data. *The American Cartographer*, 8(2):127–147, 1981.
- [lan13] Landsat Project Description. http://landsat.usgs.gov//about_project_descriptions.php, 2013. [Internet; descargado 28-octubre-2015].
- [LB05] Dengsheng Lu and Mateus Batistella. Exploring tm image texture and its relationships with biomass estimation in rondônia, brazilian amazon. *Acta Amazonica*, 35(2):249–257, 2005.
- [LG01] JL Lovell and RD Graetz. Filtering pathfinder avhrr land ndvi data for australia. *International Journal of Remote Sensing*, 22(13):2649–2654, 2001.
- [LK77] J Richard Landis and Gary G Koch. The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, pages 159–174, 1977.
- [LKC14] Thomas Lillesand, Ralph W Kiefer, and Jonathan Chipman. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, 2014.
- [MD] Jaime Márquez Díaz. Estimación de carbono arboreo por medio de imágenes del satelite spot en la región de tlaxco, tlaxcala/por jaime márquez díaz. page 157.
- [MD05] J Martínez and A Díaz. Percepción remota: fundamentos de teledetección espacial. *Recuperado 12 de 11 de 2011, de http://siga. cna. gob. mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos % 20de % 20teledetect % C3 % B3n % 20espacial. PDF*, 2005.
- [MG13] Raul Martínez Garrido. Normalización radiométrica iterativa en detección de cambios: seguimiento del tipo de cambios asociados al ecosistema mediterráneo. 2013.

- [MMP02] José A Malpica, Juan Mena, and Javier Pedraza. Fusión de información con la teoría de la evidencia para la extracción de objetos cartográficos de imágenes aéreas. *Actas del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación*, 1:511–514, 2002.
- [MP97] Harald Mehl and Osvaldo Peinado. Fundamentos del procesamiento digital de imágenes, 1997.
- [MR99] A Mateu and LA Ruiz. Comparación y evaluación de métodos de normalización radiométrica relativa. *Revista de Teledetección*, 12:99–103, 1999.
- [nat15] El ciclo del carbono. http://www.natureduca.com/cienc_gen_ciclocarbono.php, 2015.
- [ndv] NDVI COMO HERRAMIENTA ÚTIL EN LA EVOLUCIÓN DE ECOSISTEMAS. <http://constanzarojasg.blogspot.com/2014/06/ndvi-como-herramienta-util-en-la.html>. [Internet; descargado 11-noviembre-2015].
- [Nel] Corcoran E. Duarte C. M. Valdés L. De Young C. Fonseca L. Grimsditch G Nellemann, C. Carbono azul. evaluación de una respuesta rápida.
- [OAA⁺15] Jean Pierre Ometto, Ana Paula Aguiar, Talita Assis, Luciana Soler, Pedro Valle, Graciela Tejada, David M Lapola, and Patrick Meir. Amazon forest biomass density maps: tackling the uncertainty in carbon emission estimates. In *Uncertainties in Greenhouse Gas Inventories*, pages 95–110. Springer, 2015.
- [Oje13] Fabian Miguel Peralta Ojeda. *Análisis del cambio de cobertura de la tierra y estimación de carbono en el área para Parque Nacional San Rafael, año 2008/2013*. Universidad Nacional de Asunción, 2013.
- [osg15] osgeo. Grass-wiki, 2015. [Internet; descargado 28-octubre-2015].
- [Par] WWF Paraguay y la Facultad de Ciencias Agrarias ParLu. Desarrollo del estudio de lÍnea de base para el sitio piloto bosque atlantico alto parana (baapa).

- [Piz10] Cecilia Pizzurno. Proyecto de evaluación de flujos de inversión y financieros para la mitigación al cambio climático en paraguay. 54, 2010.
- [PO11] María Pérez Ortega. Aplicaciones de la teledetección y sig en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de la mancha húmeda. 2011.
- [PSD⁺15] Michael W Palace, Franklin B Sullivan, Mark J Ducey, Robert N Treuhaft, Christina Herrick, Julia Z Shimbo, and Jonas Mota-E-Silva. Estimating forest structure in a tropical forest using field measurements, a synthetic model and discrete return lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 161:1–11, 2015.
- [QGI15] QGIS. Un sistema de información geográfica libre y de código abierto, 2015. [Internet; descargado 28-octubre-2015].
- [RAAKR05] Richard J Radke, Srinivas Andra, Omar Al-Kofahi, and Badrinath Roy-sam. Image change detection algorithms: a systematic survey. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 14(3):294–307, 2005.
- [RGGSCO⁺10] VF Rodríguez-Galiano, MJ García-Soldado, M Chica-Olmo, E Pardo Igúzquiza, JP Rigol-Sánchez, and M Chica-Rivas. Análisis de cambios de usos del suelo en la «vega de granada»: correcciones radiométricas y evaluación del cambio land-cover change analysis in «vega de granada»: radiometric corrections. *Revista de Teledetección*, 2010(34):5–15, 2010.
- [RMTB⁺15] Maxime Réjou-Méchain, Blaise Tymen, Lilian Blanc, Sophie Fauset, Ted R Feldpausch, Abel Monteagudo, Oliver L Phillips, Hélène Richard, and Jérôme Chave. Using repeated small-footprint lidar acquisitions to infer spatial and temporal variations of a high-biomass neotropical forest. *Remote Sensing of Environment*, 169:93–101, 2015.
- [Rob02] Michel Robert. *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*, volume 96. Food & Agriculture Org., 2002.
- [Sal02] Emilio Chuvieco Salinero. *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. 2002.

- [SGG00] Bastienne Schlegel, Jorge Gayoso, and Javier Guerra. Manual de procedimientos para muestreos de biomasa forestal. *Universidad Austral de Chile*, 2000.
- [SH08] Zenia Salinas and Paulo Hernández. Guía para el diseño de proyectos mdl forestales y de bioenergía. 2008.
- [SHB⁺11] Sassan S Saatchi, Nancy L Harris, Sandra Brown, Michael Lefsky, Edward TA Mitchard, William Salas, Brian R Zutta, Wolfgang Buermann, Simon L Lewis, Stephen Hagen, et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24):9899–9904, 2011.
- [SHS⁺14] Xiao-Peng Song, Chengquan Huang, Joseph O Sexton, Saurabh Chantran, and John R Townshend. Annual detection of forest cover loss using time series satellite measurements of percent tree cover. *Remote Sensing*, 6(9):8878–8903, 2014.
- [Sin89] Ashbindu Singh. Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International journal of remote sensing*, 10(6):989–1003, 1989.
- [SMIY00] SA Sader, EB Martinez, DE Irwin, and HT Yax. Estimación de la deforestación en la reserva de la biosfera maya, 1997-1999. *Nuevas Perspectivas de Desarrollo Sostenible en Petén. Ed. Guatemala, Guatemala, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO)*, pages 321–324, 2000.
- [SRHS04] MVK Sivakumar, PS Roy, K Harmsen, and SK Saha. Satellite remote sensing and gis applications in agricultural meteorology. In *Proceedings of the Training Workshop in Dehradun, India. AGM-8, WMO/TD*, number 1182, 2004.
- [SZ05] FC Speranza and HR Zerda. Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales. *Proyecto Picto*, 12931, 2005.
- [TBH⁺15] A Tyukavina, A Baccini, MC Hansen, PV Potapov, SV Stehman, RA Houghton, AM Krylov, S Turubanova, and SJ Goetz. Aboveground

- carbon loss in natural and managed tropical forests from 2000 to 2012. *Environmental Research Letters*, 10(7):074002, 2015.
- [tela] Correciones a las imágenes de satélites. <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema07.pdf>. [Internet; descargado 11-noviembre-2015].
- [telb] Elementos de percepción remota. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/elementos.aspx>. [Internet; descargado 11-noviembre-2015].
- [tel15] COMBINACIONES DE COLORES. <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/combinaciones-colores.htm>, 2015.
- [TL88] F Tung and Ellsworth LeDrew. The determination of optimal threshold levels for change detection using various accuracy indexes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(10):1449–1454, 1988.
- [Tom90] C Dana Tomlin. *A map algebra*. Harvard Graduate School of Design, 1990.
- [Tro12] Denise Trevisan Troche. *Identificación de cultivos mediante Imágenes Satelitales*. Universidad Nacional de Asunción, 2012.
- [Tsu12] Satoshi Tsuyuki. *Sensoramiento y tipos de sensores selección de datos de satélite*. Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation and the Role of Conservation, Sustainable Management of Forests and Enhancement, 2012.
- [Vás11] Juan Olegario Monroy Vásquez. Minería de datos con conjuntos aproximados para clasificación de imágenes satelitales (data mining with rough sets for classification of satellite images). *Ventana Informática*, (25):141, 2011.
- [Wik15] Wikipedia. Ciclo del carbono — wikipedia, la enciclopedia libre, 2015. [Internet; descargado 28-octubre-2015].