



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN  
FACULTAD POLITÉCNICA

*INGENIERÍA EN INFORMÁTICA*

---

**Metodología automática para estimar  
pérdida de carbono a través de  
procesamiento de imágenes satelitales.  
Caso de uso Chaco Paraguay**

---

*PROYECTO FINAL DE GRADO*

*Autor:*

Santiago Smael Vera Aquino

*Tutor:*

Dr. Horacio Legal Ayala

SAN LORENZO - PARAGUAY

OCTUBRE - 2015

## *Dedicatoria*

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

# *Agradecimiento*

xxx

## *Resumen*

XXXX

# *Abstract*

XXXXXX

# Índice general

Agradecimiento	II
Resumen	III
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VIII
Abreviaciones	IX
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Justificación y Motivación . . . . .	4
1.2. Antecedentes . . . . .	4
1.3. Planteamiento del problema . . . . .	6
1.4. Objetivos . . . . .	6
1.4.1. Objetivos Generales . . . . .	7
1.4.2. Objetivos Específicos . . . . .	7
1.5. Organización de la Tesis . . . . .	7
<b>2. Cambio Climático</b>	<b>9</b>
2.1. Ciclo de carbono . . . . .	9
2.1.1. Secuestro de carbono . . . . .	10
2.1.2. Pérdida de Carbono . . . . .	11
2.1.3. Secuestro de carbono en Paraguay . . . . .	11
2.1.4. Gran Chaco Americano . . . . .	11
2.2. Biomasa . . . . .	12
2.2.1. Biomasa Forestal . . . . .	12
2.3. Medición de balances de carbono . . . . .	13
2.4. Teledetección en el medio ambiente . . . . .	14
<b>3. Procesamiento de imágenes satelitales</b>	<b>16</b>
3.1. Sensores Remotos . . . . .	16
3.1.1. El espectro electromagnético . . . . .	17
3.1.2. Firmas espectrales . . . . .	17
3.1.3. Resoluciones de un sensor . . . . .	18

---

3.2. Imágenes satelitales . . . . .	20
3.2.1. Tipo de imágenes satelitales . . . . .	20
3.3. Índices de vegetación . . . . .	21
3.3.1. Índice de vegetación diferencial normalizada . . . . .	21
3.4. Análisis Multitemporal . . . . .	22
3.5. Correcciones a las imágenes de satélites . . . . .	22
3.5.1. Corrección geométrica . . . . .	23
3.5.2. Corrección radiométrica . . . . .	26

# Índice de figuras

2.1. Ciclo de carbono. . . . .	10
2.2. Tipos de sensores. . . . .	14
3.1. Firmas espectrales de diferentes coberturas. . . . .	18
3.2. Resolución espacial. . . . .	18
3.3. Resolución espectral igual a 3 para el sensor SPOT y 7 en el sensor Landsat. . . . .	19
3.4. Resolución radiométrica de 8 bits (0 a 255 niveles digitales). . . . .	19
3.5. Resolución temporal de 16 días. . . . .	20
3.6. Localización de puntos comunes y puntos de referencia. . . . .	24
3.7. Interpolación espacial con polinomios de primer y segundo orden. . . . .	25
3.8. Métodos de interpolación radiométricas. . . . .	26



# Índice de tablas

2.1. Problemática que afrontan los países del gran chaco americano . . . . .	12
--	----

# Abreviaciones

<b>GEI</b>	<i>Gases de Efecto Invernadero.</i>
<b>CO<sub>2</sub></b>	<i>Dióxido de carbono.</i>
<b>C</b>	<i>Carbono.</i>
<b>SIG</b>	<i>Sistemas de Información Geográficas.</i>
<b>REDD+</b>	<i>Reducción de GEI por la Deforestación y Degradación de bosques.</i>
<b>RMSE</b>	<i>Error cuadrático medio.</i>
<b>ParLu</b>	<i>Paraguay Land Use.</i>
<b>WWF</b>	<i>World Wildlife Fund.</i>
<b>ENPAB</b>	<i>Estrategia nacional y plan de acción para la conservación de la Biodiversidad.</i>
<b>VD</b>	<i>Valor Digital.</i>
<b>FMAM</b>	<i>Fondo para el Medio Ambiente Mundial.</i>
<b>PDD</b>	<i>Programa de Pequeñas Donaciones.</i>
<b>LiDAR</b>	<i>Detección área de luz y medidas de rango.</i>
<b>NDVI</b>	<i>Índice de vegetación diferencial normalizada.</i>
<b>UTM</b>	<i>Universal Transverse Mercator.</i>
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Squared Error.</i>



# Capítulo 1

## Introducción

De entre los servicios ambientales que proporcionan los bosques, la captura de carbono será 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). El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el gas mas abundante, contribuyendo con un 76 % al GEI [[ÁJB<sup>+</sup>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. 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 y la silvicultura son responsables del 15-20 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero[[Oje](#)].

El **ciclo de carbono** son las transformaciones químicas de compuestos que contienen carbono en los intercambios entre biosfera, atmósfera, hidrosfera y litosfera. La fotosíntesis de las plantas constituye un proceso fundamental en el ciclo ya que permite separar el  $\text{CO}_2$  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 periodos prolongados [[AMVMEB<sup>+</sup>03](#)].

De manera general 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. En

nuestro caso utilizaremos la definición de biomasa forestal 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, nos permite adquirir imágenes de la superficie terrestre[LK94] empleando el uso de informaciones provenientes de sensores instalados en plataformas espaciales, complementados con sistemas de información geográficas (SIG) para un análisis mas continuo 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 poseen un comportamiento característico en su radiación, permitiendo a través de la imágenes proveídos por los sensores remotos calcular índices que varían dentro de márgenes conocidos indicando el vigor de la vegetación o la densidad de la biomasa forestal. A esto, junto con la comparación multitemporal sera posible identificar la evolución de coberturas vegetales en periodos de tiempos obteniendo resultados cualitativos y/o cuantitativos en espacio y tiempo[MG13].

Existen muchos métodos para la detección de cambios de vegetación pero en su mayoría requieren una supervisión y un trabajo de campo como también la utilización de complejos sistemas de información geográfica bajo licencia que elevan el costo de los estudios. En vista a esto, se propone diseñar e implementar una metodología automática que permita estimar la perdida de carbono a través de la biomasa de forma dinámica, empleando procesamiento de imágenes satelitales disponibles de forma libre.

Dentro de todo esto, la falta de una mayor información nos lleva a varios cuestionamientos de como estamos manejando nuestro medio ambiente y de que efectos acarrearán esos usos, por lo que el empleo de la teledetección y las imágenes satelitales multitemporales nos permitirán 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 referentes al ambiente son escasos a causa de los altos costos y las dificultades de acceso a la hora de realizar muestreos en el terreno.

## 1.1. Justificación y Motivación

REDD+ es una iniciativa que tiene como objetivo reducir la pérdida de bosques, las actividades REDD+ evitan pérdidas como emisiones de gases de efecto invernadero (conservación, no deforestación, no degradación), mantienen el depósito o stock de carbono (conservación, gestión sostenible), o incrementan el depósito por su efecto de retención o sumidero de carbono (conservación, restauración, gestión sostenible)[Oje].

El Paraguay se ha embarcado en el proceso de preparación para Reducir la Deforestación y Degradación forestal (REDD+) a fin de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, conservar los bosques y su biodiversidad, por tanto se busca elaborar una estrategia nacional, con políticas socios ambientales y económicos viables, así como el desarrollo de capacidades.

Así 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].

La mayoría de las investigaciones para estimar y mapear la biomasa en bosques se centran en las técnicas de Sensores Remotos; debido a 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 debido a la variabilidad natural espacial de la biomasa forestal. Por ello la necesidad de crear metodologías que ayuden al monitoreo de forma dinámica y barata nos 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

Sassan Saatchi[SHB<sup>+</sup>11] el proyecto del Mapa global de carbono desarrollado por 15 científicos de varios continentes pertenecientes al Instituto del Medio ambiente de la Universidad de California, Los Ángeles en el año 2011, abarca más de 2.5 millones de hectáreas de bosques en tres continentes, abarcando todos los bosques tropicales, dónde

ha trazado el stock total de carbono en la biomasa viva (por debajo y por encima), utilizando una combinación de datos de 4079 en parcelas de inventario in situ y de detección de luz vía satélite y LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) que van generando muestras de las estructuras de bosques de manera a estimar el almacenamiento de carbono, además de imágenes ópticas y de microondas para extrapolar toda la superficie terrestre..

Existen trabajos realizados por estudiantes de la Facultad de Ciencias Agrarias - UNA como proyecto de grado en zonas específicas como la reserva de la biosfera del Chaco, Parque Nacional San Rafael y el Parque Nacional Defensores del chaco, todos ellos en la región Occidental del Paraguay. Implementan una metodología base hecha en el marco denominado *Desarrollo del estudio de linea de base para el sitio piloto Bosque atlántico de Alto Paraná. (BAAPA)* realizado por el Paraguay Land Use (ParLu), el cual es una iniciativa de World Wildlife Fund (WWF) Paraguay y WWF Alemania que apoya las iniciativas REDD+ en Paraguay, generando mapas de stock de carbono y los correspondientes mapas de cobertura y de Deforestación 2000–2005 y 2005–2011 a partir de muestreos de parcelas in situ y clasificaciones supervisadas con la ayuda de aplicaciones con licencias de carácter propietario, todo esto conjuntamente con la Carrera de Ingeniería Forestal de la Facultad de Ciencias Agrarias perteneciente a la Universidad Nacional de Asunción .

Un estudio realizado por el Instituto para estudios avanzados de Computación de la Universidad de de Maryland denominado Forest Cover Change in Paraguay, nos muestra el cambio de vegetación estimado en todo el país utilizando un método iterativo de etiquetado de cambio por clusterización supervisada. El trabajo detecta cambios de los años 1992 al 2000, donde aparte de proveer un etiquetado de cambios de vegetación fue realizada con imágenes de acceso libre, generando información más precisa. Las validaciones fueron hechas con varias imágenes satelitales de alta precisión, no libres, con una precisión global en todas, mayor al 90 % para cambio/no cambio de áreas forestales/no forestales[[HKS<sup>+</sup>09](#)].

### 1.3. Planteamiento del problema

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.

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 como la Ley de Deforestación Cero en la Región Oriental del Paraguay promulgada en el año 2004, y que será extendida hasta el 2018 y, la Ley de servicios ambientales 3001/06, entre otros instrumentos, los mismos necesitan apoyo para su monitoreo y aplicación efectiva, debido a que los costos en tiempo y dinero son elevados por la necesidad de realizar muestreos en el terreno y de adquirir licencias para las herramientas de monitoreo.

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].

### 1.4. Objetivos

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



### 1.4.1. Objetivos Generales

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

### 1.4.2. Objetivos Específicos

Para el logro de los objetivos generales 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 para la comparación multi-temporal
- Determinar la relación entre la biomasa 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 en 6 capítulos.

- En el capítulo 2 .
- En el capítulo 3 .
- En el capítulo 4 .
- En el capítulo 5 .
- En el capítulo 6 se presentan las conclusiones finales tras los experimentos y análisis de resultados del proyecto, por último los trabajos futuros que podrían dar continuidad al trabajo final de grado.



## Capítulo 2

# Cambio Climático

Es definido como cualquier cambio 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](#)].

La 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 los gases de Efecto Invernadero (GEI), impiden el escape de este calor hacia el espacio . Este es un escape que mantiene a la tierra a una temperatura promedio arriba del punto de congelación del agua y permite la vida. Sin embargo, las actividades humanas están produciendo un exceso de gases que están potencialmente calentando el clima de la tierra[[Dur](#)].

### 2.1. Ciclo de carbono

Mediante la fotosíntesis, las plantas absorben el dióxido de carbono existente en el aire o el agua, y lo acumulan en los tejidos vegetales en forma de materia orgánica. Posteriormente, los animales herbívoros se alimentan de estos vegetales, de los que obtienen energía, para transferir esa energía a los demás niveles (carnívoros que se alimentan de los herbívoros). Esa energía 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). En su acumulación en las zonas húmedas genera turba, 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, etc. Además de la actividad que llevan a cabo los reino vegetal y animal en el ciclo del carbono, también entra dentro de éste el carbono liberado mediante la putrefacción y la combustión[nat]

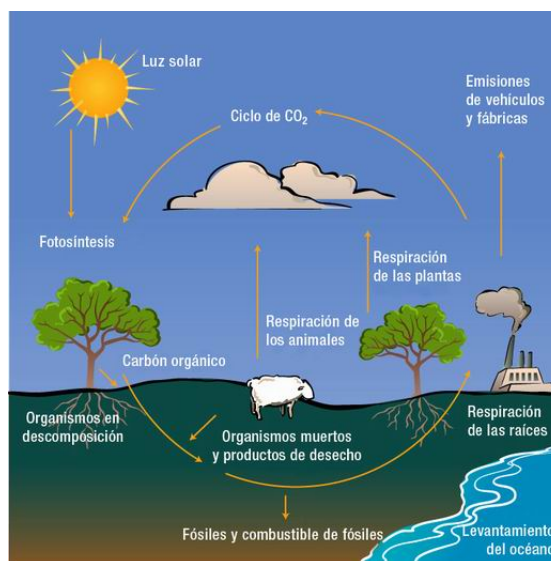


FIGURA 2.1: Ciclo de carbono.

### 2.1.1. Secuestro de carbono

El CO<sub>2</sub> y otros gases invernaderos actúan atrapando la energía calórica (radiación solar de onda corta) reflejada de la superficie de la tierra y las nubes. Este calor retenido puede conducir al calentamiento global en el planeta. A través del secuestro de carbono, los niveles del dióxido de carbono atmosférico pueden reducirse en la misma medida que los niveles de carbono orgánico del suelo aumentan. 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 CO<sub>2</sub>, disminuyendo las probabilidades de calentamiento global[[eeS](#)].

### **2.1.2. Pérdida de Carbono**

Nos referimos a pérdida de carbono a aquella porción 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, 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**

Según el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) y el Programa de Pequeñas Donaciones (PDD), en nuestro país, 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, en consecuencia influyendo al cambio climático[[Piz10](#)].

### **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.

TABLA 2.1: Problemática que afrontan los países del gran chaco americano

<b>Argentina</b>	<b>Bolivia</b>	<b>Paraguay</b>
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.
Pérdida de biodiversidad.	Cambio climático.	Pérdida de biodiversidad.
Cambio climático.		Cambio climático.

## 2.2. 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 se incluyen los restos de plantas que han muerto recientemente (biomasa muerta). La cantidad de biomasa se expresa mediante su peso en seco o su contenido de energía de carbono o de nitrógeno [GMKM<sup>+</sup>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. Normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso verde o seco. Es frecuente separada en componentes, donde los más típicos corresponden a la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta[SGG00]. En términos de pérdida y secuestro, representa la cantidad potencial de C 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<sup>+</sup>08]. Existen metodologías que permiten medir y monitorear cambios en reservorios promedios de carbono por unidad de área,

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

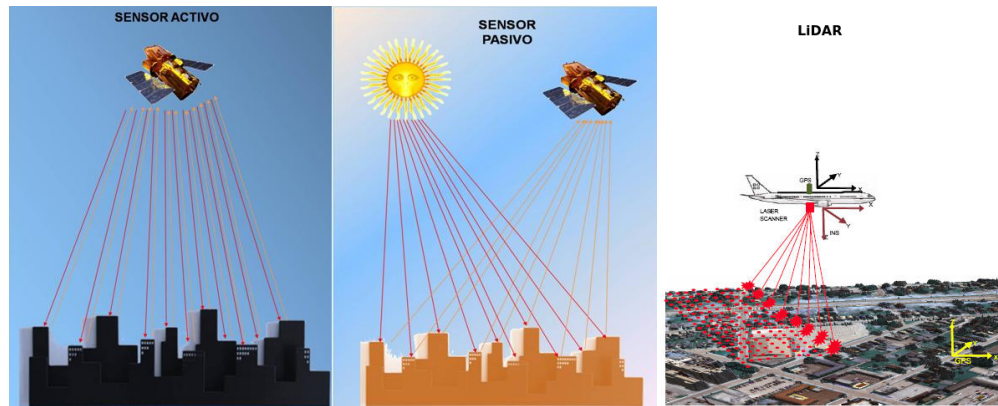


FIGURA 2.2: Tipos de sensores.

## 2.4. Teledetección en el medio ambiente

El término teledetección está 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]. Su aplicación en los recursos naturales se fundamenta en que los elementos del mismo, tienen una respuesta espectral propia a los sensores remotos, por ello la teledetección espacial es empleada como complemento y no como sustituto a estudios ambientales ya que posibilitan 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].





## 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. A todo esto sumándole el comportamiento característico que poseen los recursos naturales a sensores espaciales, nos posibilita el empleo amplio de técnicas de procesamiento de imágenes provechosos para el logro de los objetivos en la investigación. 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, área y satelital), mediante la captura de energías reflejadas o radiadas proveniente del sol (sensores pasivos) o del mismo sensor (sensores activos) para luego ser transformadas en productos con diversos y diferentes especificaciones, siendo fotografías aéreas e imágenes de satélites los más conocidos.

### 3.1.1. El espectro electromagnético

A pesar de que las longitudes de ondas son continuas, se establece un serie de bandas donde las radiaciones manifiestan un comportamiento similar organizando las 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  $\mu$ m a 8  $\mu$ m) en esta franja se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Se utiliza para estimar contenido de humedad en la vegetación y los focos de alta temperatura.
- **Infrarrojo lejano o térmico:** (8  $\mu$ m a 14  $\mu$ m) se detecta el calor de la mayoría de las cubiertas terrestres.
- **Microondas:** (a partir de 1  $\mu$ m) de gran interés por ser un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa.

### 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. Ayudan a identificar los objetos en la superficie terrestre debido a que cada uno presenta una respuesta espectral única[SRHS04].

En la siguiente figura se observa como cada objeto difiere de los demás en sus firmas espectrales:

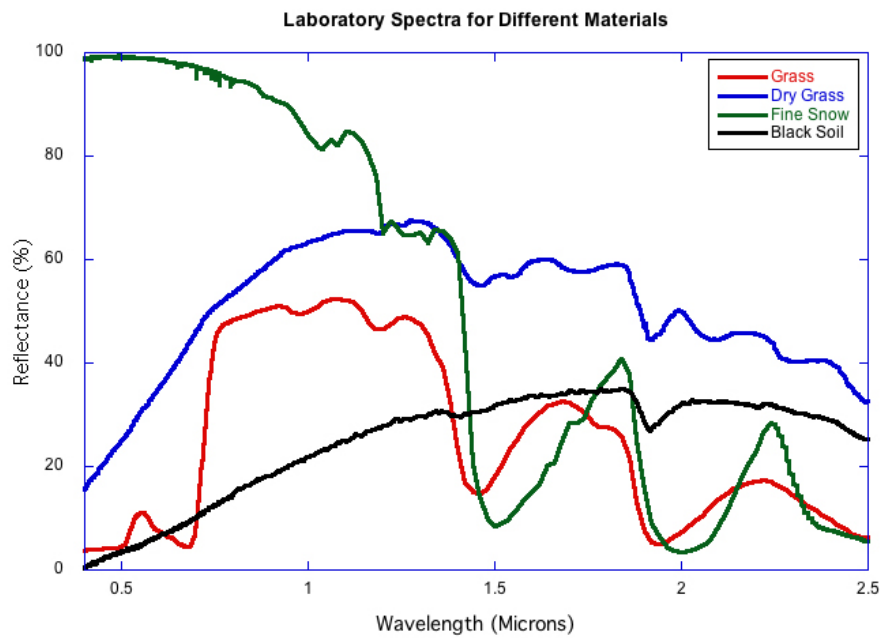


FIGURA 3.1: Firmas espectrales de diferentes coberturas.

### 3.1.3. Resoluciones de un sensor

Se define a la resolución de un sensor 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 [Oje]:

- **Resolución espacial:** Es el tamaño que representa en el terreno una unidad de pixel de la imagen. Tiene mucha importancia en la interpretación pues marca el nivel de detalle que ofrece, cuanto menor sea el tamaño del pixel, menor será también la probabilidad de que corresponda a un compuesto de dos o más áreas fronterizas.

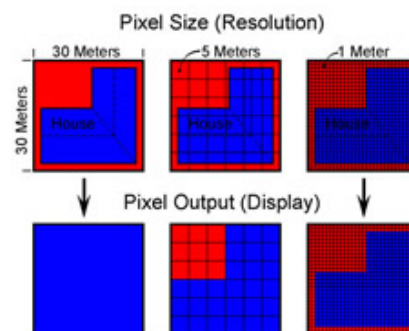


FIGURA 3.2: Resolución espacial.

- **Resolución espectral:** 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 caracterización espectral de las distintas cubiertas.

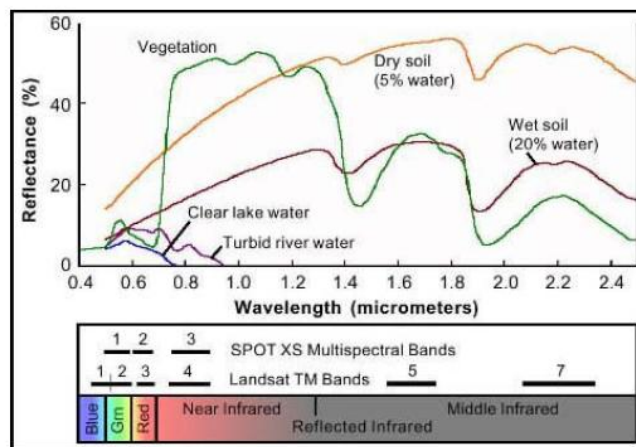


FIGURA 3.3: Resolución espectral igual a 3 para el sensor SPOT y 7 en el sensor Landsat.

- **Resolución radiométrica:** Es la sensibilidad del sensor para detectar variaciones en la cantidad de energía espectral recibida. La sensibilidad se expresa en bits e indica el número de los distintos niveles radiométricos que puede detectar un sensor.

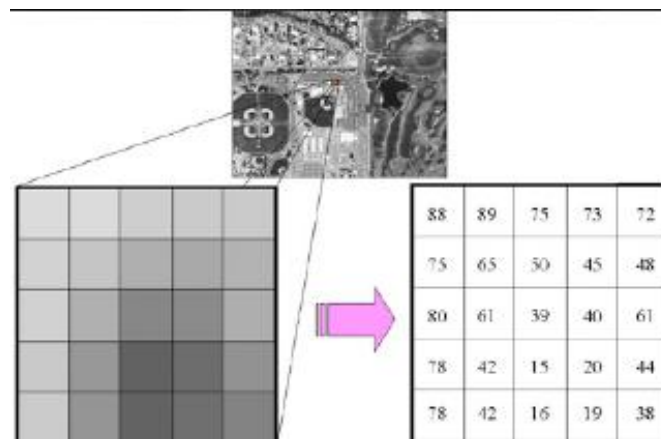


FIGURA 3.4: Resolución radiométrica de 8 bits (0 a 255 niveles digitales).

- **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 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.

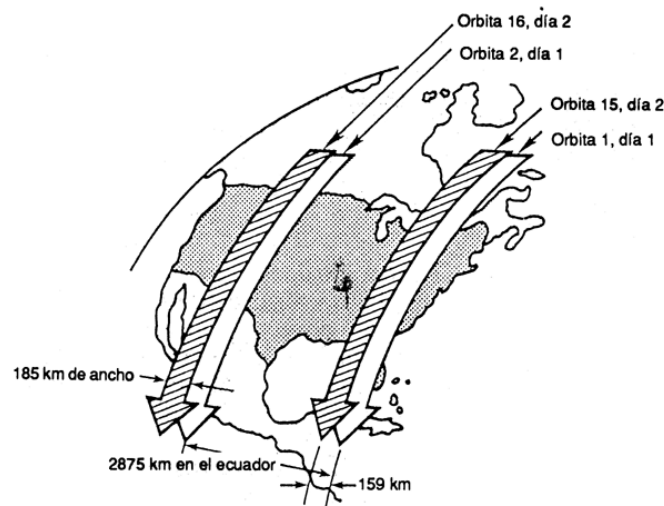


FIGURA 3.5: Resolución temporal de 16 días.

## 3.2. Imágenes satelitales

Una imagen satelital o imagen de satélite se puede definir como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Están organizados en un arreglo matricial bidimensional de elementos llamados píxeles, donde cada píxel representa un área de superficie sobre la tierra con un valor de intensidad y una ubicación en la imagen, también son conocidas como imágenes ráster [AVKA03].

### 3.2.1. Tipo de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales se dividen en dos tipos [Sal02]:

- **Pancromáticas:** se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia de energía en una amplia parte del espectro electromagnético. Para los sensores pancromáticos más modernos, esta única banda suele abarcar la parte visible e infrarrojo cercano del espectro. Los datos pancromáticos se representan por medio de imágenes en blanco y negro.
- **Multiespectrales:** se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas. Por ejemplo, un conjunto de detectores puede medir energía

roja reflejada dentro de la parte visible del espectro mientras que otro conjunto mide la energía del infrarrojo cercano. Es posible incluso que dos series de detectores midan la energía en dos partes diferentes de la misma longitud de onda. Estos distintos valores de reflectancia se combinan para crear imágenes de color.

### 3.3. 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”, el índice de vegetación más utilizado es el NDVI (Índice de vegetación diferencial normalizada)[SMIY00].

#### 3.3.1. Índice de vegetación diferencial normalizada

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.

Chuvieco[Sal02] menciona que 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, detectando fenómenos de amplio rango.

Se calcula extrayendo de las bandas correspondientes al rojo  $B_R$  e infrarrojo próximo  $B_{IRc}$  según la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{B_{IRc} - B_R}{B_{IRc} + B_R} \quad (3.1)$$

Las plantas muestran un fuerte pico de absorción causados por los pigmentos fotosintéticos en longitudes de onda cercanas a los 700 micrones, hecho que contrasta con una fuerte reflexión de las longitudes de onda del infrarrojo cercano. Por su parte, los suelos desnudos se caracterizan por un incremento suavemente monotónico de la reflectancia, a medida que aumenta la longitud de onda.

### 3.4. Análisis Multitemporal

Básicamente el análisis multitemporal consiste en el estudio de zonas determinadas mediante tomas hechas en diferentes tiempos, Chuvieco [Sal02] resalta que 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, esta última se enfoca a detectar cambios entre dos o más fechas alejadas en el tiempo, estudia el dinamismo temporal de una determinada zona, como por ejemplo: el crecimiento urbano, transformaciones agrícolas, entre otras.

Sea uno u otro 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 influye desde la captura de información hasta su transformación final a niveles digitales que podrían afectar el análisis.

### 3.5. Correcciones a las imágenes de satélites

Una imagen de satélite está sometida a una serie de interferencias que hacen que la información que quiere obtenerse aparezca perturbada por una serie de errores:

- Fallos en los sensores, generan pixeles incorrectos.
- Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación e los sensores, generan distorsiones en la imagen global.
- Interferencia de la atmósfera, alteran de forma sistemática los valores de los pixeles.



### 3.5.1. 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.

El proceso consiste en dar a cada pixel su localización en un sistema de coordenadas estandar (UTM, lambert, coordenadas geográficas) para poder, de este modo, combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG. Mediante esto, se obtiene una nueva capa 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 referencias, como tarea inicial para la corrección geométrica, de manera a poder realizar una interpolación espacial y de los valores radiométricos.

#### 3.5.1.1. Interpolación espacial

Consiste en la determinación de la relación geométrica entre las coordenadas del pixel de la imagen a corregir y las coordenadas correspondientes. Utilizando los puntos comunes localizados, se plantea una ecuación de transformación mediante la cual se obtiene la posición de los pixeles en la imagen de salida, ilustrada en la figura 3.6. Este proceso también es conocido como Georreferenciación. El método mas utilizado para la transformación es el de ecuaciones polinómicas.

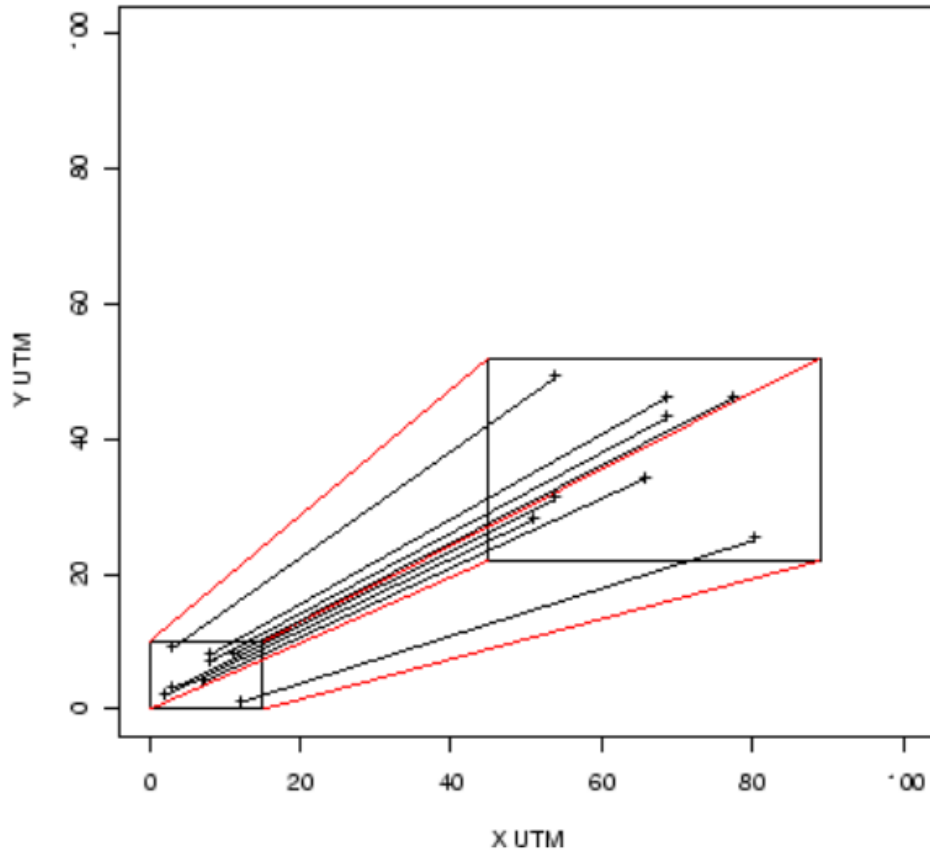


FIGURA 3.6: Localización de puntos comunes y puntos de referencia.

La transformación puede expresarse de la siguiente manera:

$$s = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} a_{ij} c^j l^k \quad (3.2)$$

Donde  $s$  indica la coordenada en la imagen corregida,  $c$  y  $l$  representan las coordenadas de la imagen de entrada. El superíndice  $m$  indica el grado del polinomio de ajuste. Siendo la ecuación lineal la mas simple:

$$x_i = a_0 + a_1 c_i + a_2 l_i \quad (3.3)$$

$$y_i = b_0 + b_1 c_i + b_2 l_i \quad (3.4)$$

En distorsiones moderadas o en un área reducida, se utilizan transformaciones de primer orden, pudiendo corregir efectos de translación en  $x$  e  $y$ , 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. Para calcular la calidad en la interpolación espacial y los puntos de control seleccionados, se utiliza el error cuadrático medio (RMS).

$$RMS = \sqrt{(c_{corr} - c_{orig})^2 + (l_{corr} - l_{orig})^2} \quad (3.5)$$

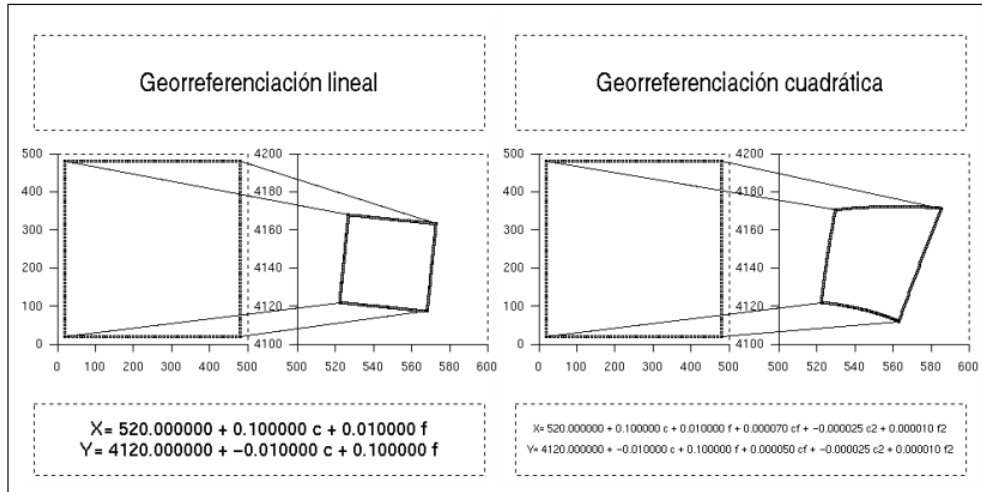


FIGURA 3.7: Interpolación espacial con polinomios de primer y segundo orden.

### 3.5.1.2. 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. Lo que se pretende es crear una imagen que se corresponda con estas coordenadas, por lo tanto, resulta necesario trasvasar de alguna forma, los niveles digital originales a su nueva posición. Pudiéndose ser abordada por tres métodos diferentes:

- **Vecino más próximo:** situá en cada celda de la imagen corregida el nivel digital 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.
- **Interpolación bilineal:** promedia del nivel digital de los cuatros pixeles más cercanos en la imagen original. Este promedio se ponderan según la distancia del pixel original al corregido; tienen una mayor influencia aquellos pixeles más

cercanos en la imagen inicial, pero tienden a difuminar un tanto los contrastes espaciales de la imagen original.

- **Convolución cúbica:** considera los niveles digitales de los 16 píxeles más próximos. El efecto visual es más correcto, pero supone un volumen de cálculo mucho más elevado.

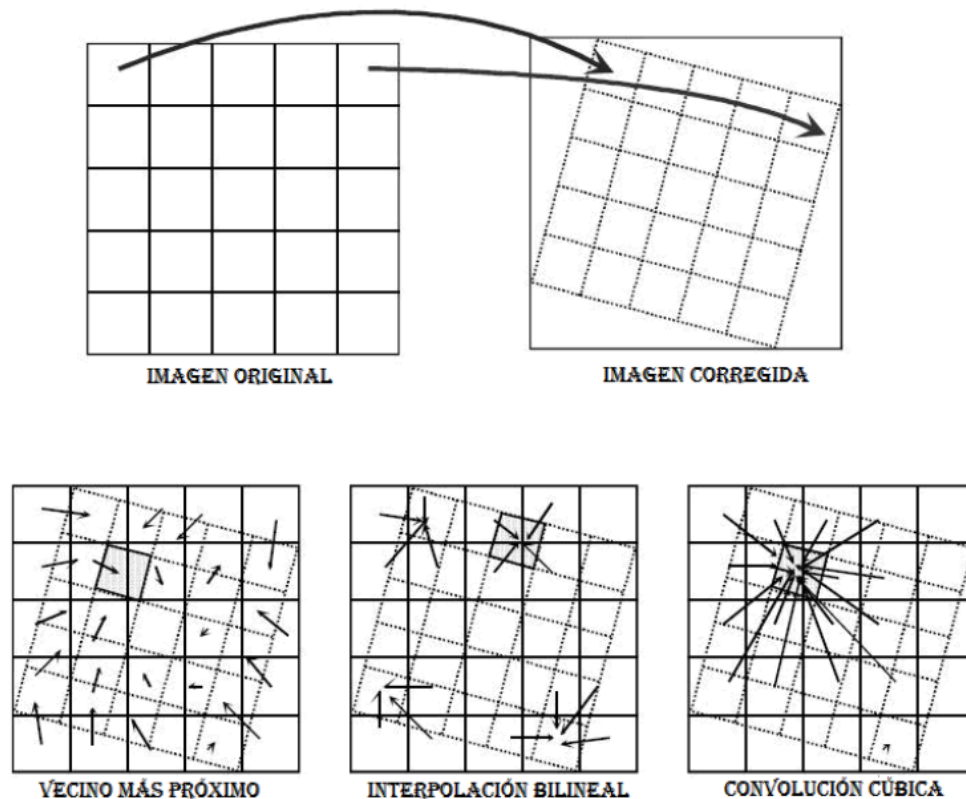


FIGURA 3.8: Métodos de interpolación radiométricas.

### 3.5.2. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica se encarga de minimizar los desajustes producidos en el registro del valor digital en las celdas 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 bandeo en la imagen.

### 3.5.2.1. Píxeles o líneas perdidas

Si se ha perdido el valor de algún píxel la solución más simple sería estimarlo como la media de los valores del mismo píxel en las líneas anterior y posterior (no es recomendable utilizar los píxeles contiguos de la misma línea por que han sido captados por el mismo detector o banda que ha dado el fallo, por tanto son poco fiables).

$$ND_{i,j} = round(\frac{ND_{i-1,j} + ND_{i+1,j}}{2}) \quad (3.6)$$

Siendo  $ND$  el valor digital de la imagen,  $round()$  función que indica el redondeo entero más cercano.

Las diferentes bandas ( $k$  y  $r$ ) de una imagen están altamente correlacionadas y además los detectores de dos bandas diferentes no son los mismos. Por tanto podría utilizarse el valor del píxel faltante en una banda diferente para mejorar la estimación:

$$ND_{i,j,k} = round(\frac{s_k}{s_r}(ND_{i,j,r} - \frac{ND_{i+1,j,r} - ND_{i-1,j,r}}{2} + \frac{ND_{i+1,j,k} + ND_{i-1,j,k}}{2})) \quad (3.7)$$

En caso de que la imagen abarque un territorio amplio y cambiante resulta recomendable calcular los coeficientes de correlación y las desviaciones típicas ( $sk$  y  $sr$ ) en un entorno cercano al píxel 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 píxel con los de los 8 píxeles vecinos mediante algún procedimiento de filtrado.

### 3.5.2.2. Bandeado

El fenómeno del bandeo 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 bandeo 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  $a_k$  y  $b_k$  para una corrección lineal de cada uno de las bandas.

$$b_k = \frac{s}{s_k} \quad (3.8)$$

$$a_k = m - b_k m_k \quad (3.9)$$

Donde  $m$  y  $s$  son la media y la desviación típica del conjunto de píxeles de la imagen y  $m_k$  y  $s_k$  la media y la desviación típica de los píxeles obtenidos por el detector  $k$ . A continuación los  $ND$  de la imagen se recalculan como:

$$ND'_{i,j} = a_k + b_k ND_{i,j} \quad (3.10)$$

asumiendo que la línea  $i$  pertenece a la banda  $k$ .



# Bibliografía

- [A<sup>+</sup>08] Arild Angelsen et al. *Moving ahead with REDD: issues, options and implications*. Cifor, 2008.
- [ÁJB<sup>+</sup>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<sup>+</sup>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<sup>+</sup>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.
- [AVKA03] León Bendayán Acosta, José Sanjurjo Vílchez, Risto Kalliola, and Fernando Rodríguez Achung. Experiencia de la tecnología de percepción remota para la elaboración del mosaico de imágenes de satélite landsat tm en la selva baja de la amazonía peruana. *Folia Amazónica*, page 73, 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.
- [Dur] Kris Vanessa Almando Dure. Estimación de carbono almacenado en el parque nacional defensores del chaco según formación vegetal mediante imágenes satelitales, año 2014.
- [eeS] Secuestro de Carbono en el Suelo. Captura de carbono.
- [fao03] Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*, 54, 2003.
- [GMKM<sup>+</sup>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.
- [GS03] M Garzuglia and M Saket. Wood volume and woody biomass. *Food and Agricultural Organization of the United Nations. Roma*, page 30, 2003.
- [HKS<sup>+</sup>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.

- [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.
- [LK94] Thomas M Lillesand and Ralph W Kiefer. Remote sensing and image interpretation. john willey & sons. *Inc, United States of America*, 1994.
- [MG13] Raul Martínez Garrido. Normalización radiométrica iterativa en detección de cambios: seguimiento del tipo de cambios asociados al ecosistema mediterráneo. 2013.
- [nat] natureduca. El ciclo del carbono.
- [Nel] Corcoran E. Duarte C. M. Valdés L. De Young C. Fonseca L. Grimsditch G Nellemann, C. Carbono azul. evaluación de una respuesta rápida.
- [Oje] Fabian Miguel Peralta Ojeda. Analisis del cambio de cobertura de la tierra y estimacion de carbono en el area para parque nacional san rafael, año 2008/2013.
- [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.
- [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<sup>+</sup>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.
- [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.
- [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.