

TRABAJO FIN DE MÁSTER

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE CARBONO EN BOSQUE MEDITERRÁNEO CHILENO MEDIANTE IMÁGNES HIPERESPECTRALES

Autor: Miguel Ibáñez Álvarez

Directores: Javier Cano Martín y Dr. Fernando Pérez Cabello

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Noviembre de 2013



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

El problema del cambio climático, se debe en parte al aumento de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), uno de ellos en particular, especialmente el CO₂. Los ecosistemas forestales intervienen en la lucha contra el cambio climático a través de la absorción de grandes cantidades de CO₂ gracias a la fotosíntesis. Chile participa en el llamado 'Mercado de bonos de Carbono' como emisor de éstos, por lo que está desarrollando políticas de gestión, a través de las cuales, disminuyan las emisiones de carbono asociadas a la deforestación, haya un manejo forestal mejorado y se valoricen los productos maderables.

Por otro lado, en multitud de estudios científicos se demuestra que las imágenes hiperespectrales son una buena herramienta para estimar variables biofísicas de las cubiertas vegetales.

Dentro de este marco, este proyecto pretende desarrollar una metodología para estimar la cantidad de carbono capturado en los bosques nativos chilenos de la región mediterránea a través de una imagen de alta resolución espectral. A partir de la información de esta imagen se generan 8 índices de vegetación, los cuales se correlacionan con el contenido de carbono capturado de muestras medidas en terreno. El objetivo es generar un algoritmo que permita estimar el contenido de carbono en este tipo de bosque.

La zona de estudio está cercana a la ciudad de Santiago de Chile, en el paraje de San Carlos de Apoquindo, donde se encuentra una buena representación del bosque mediterráneo chileno.

El vuelo para la captura de la imagen se realizó en enero del 2013 mediante el sensor Hypspec VNIR-1600 HS, el cual tiene una resolución espacial de 32 cm, y una resolución espectral de 160 bandas distribuidas en el espectro del visible y del infrarrojo cercano.

En el mes de octubre se recoge información de campo, esta información consiste en medidas dendrométricas de las especies localizadas en la zona de estudio, que posteriormente se implementa en la funciones alométricas, desarrolladas por la empresa Oterra, para el cálculo de carbono en campo.

Palabras Clave: *Carbono capturado, imagen hiperespectral, índice de vegetación, función alométrica.*

Abstract

Climate change problem is due in part to increased emissions of greenhouse gases (GHG), especially CO₂. Forest ecosystems involved in the fight against climate change by absorbing large amounts of CO₂ by photosynthesis. Chile participates in the so-called 'Carbon credits' as issuer of these, so management is developing policies, through which, reduce carbon emissions from deforestation, improved forest management and recovered wood products.

On the other hand, in many scientific studies demonstrated that hyperspectral imaging is a good tool to estimate biophysical variables groundcovers.

Within this context, this project aims to develop a methodology for estimating the amount of carbon sequestered in Chilean native forests in the Mediterranean region through a high spectral resolution image. From this image information generated 8 vegetation indices, which are correlated with the captured carbon content of field samples. The aim is to create an algorithm to estimate the carbon content in this kind of forest.

The study area is near the city of Santiago de Chile, in the hamlet of San Carlos de Apoquindo, which is a good representation of the Chilean Mediterranean forests.

The flight to capture the image was made in January 2013 by Hypesx VNIR sensor HS - 1600, which has a spatial resolution of 32 cm and a spectral resolution of 160 bands spread across the spectrum of visible and near-infrared.

In the month of October is collected field data, this information is dendrometric measures of the species in the study area, which was later implemented in the allometric functions, developed by the company Oterra for carbon accounting in field.

Keywords: *Carbon capture, hyperspectral imaging, vegetation index, allometric function.*

ÍNDICE

1	Introducción	4
1.1	Objetivos	5
1.2	Justificación	5
1.3	Antecedentes	6
2	Características generales del área de estudio.....	7
2.1	Condicionantes naturales	7
2.2	Condicionantes históricos y antrópicos.....	8
3	Material	8
4	Metodología.....	12
4.1	Datos de campo.....	13
4.1.1	Procesado de los datos de campo	13
4.2	Trabajo sobre imagen hiperespectral.....	14
4.2.1	Planificación del vuelo	14
4.2.2	Captura de la imagen.....	15
4.2.3	Transformación a radiancia	17
4.2.4	Corrección atmosférica y geométrica.....	17
4.3	Índices de vegetación.....	22
4.3.1	Descripción de los índices de vegetación:	22
4.3.2	Aplicación de los índices de vegetación.....	25
5	Resultados	28
5.1	Coeficiente de correlación de Pearson y análisis de regresión lineal.	28
5.2	Análisis de variabilidad	32
6	Conclusiones y consideraciones generales	34
7	Anexos:	36
8	Referencias bibliográficas	51

1 INTRODUCCIÓN

La discusión científica actual respecto al aumento de la concentración del dióxido de carbono (UACH, 2013) en la atmósfera, el cambio climático y la preocupación de los gobiernos por generar acuerdos con iniciativas de sostenibilidad (Tickle et al., 2001) están determinando estudios sobre el rol del bosque en el secuestro de carbono (Gorte, W. 2009), el crecimiento de la demanda para estimar biomasa¹, la productividad potencial, y el crecimiento forestal a escala local y global (Tickle et al., 2001).

En el marco de los acuerdos logrados a través del organismo de las Naciones Unidas, se crea un mecanismo orientado a compensar emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que realizan empresas de países desarrollados, responsables del 80% de las emisiones de estos gases, por la vía de la asociación o arreglos comerciales con empresas de otros países, denominado el país receptor, de forma que las reducciones o capturas logradas puedan ser acreditadas en su totalidad o en parte al país emisor. Este mecanismo se denomina “Mecanismo de desarrollo limpio” (UACH 2013).

Esta condición genera una gran oportunidad para el país, y en particular para el sector forestal, donde el manejo de bosques nativos y el desarrollo de nuevas plantaciones ofrecen la posibilidad de generar una alta oferta de captura de carbono, transable en este mercado naciente, con nuevas posibilidades de negocio para el país (UACH, 2013).

En este contexto, la Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF) está en un proceso de definir proyectos genéricos, denominados *Tipologías de Proyectos asociados a la Plataforma de Generación y Transacción de Bonos de Carbono del Sector Forestal en Chile* (PBCCh), cuyo fin es reducir los costos, tiempos y especificaciones técnicas de la comercialización de bonos de carbono para los propietarios de recursos forestales que deseen ingresar al mercado voluntario, teniendo en cuenta las exigencias del Estándar Verificado de Carbono (*Verified Carbon Standard, VCS*).

CONAF ha determinado un marco de referencia que define Tipología como aquellos proyectos genéricos o marco, asociados a un tipo de recurso específico en el cual, independiente de la propiedad de la tierra, es posible aplicar esquemas silvícolas y de financiamiento común tendiente a compatibilizar objetivos de producción de bienes y servicios tradicionales con la captura de carbono para su comercialización posterior. En este contexto, las tipologías seleccionadas para analizar están enmarcadas en las actividades de forestación, reforestación y revegetación (ARR) del sector Agricultura, Forestal y otros Usos de la Tierra (AFOLU) reconocidas a nivel internacional por el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC) y el estándar VCS.

En dicho marco se plantean 12 tipologías de proyectos, entre las cuales se ha incluido la de Restauración de Bosques Mediterráneos (Tipología 3), iniciándose para todas ellas, un proceso de elaboración de insumos técnicos y metodológicos que permitan avanzar en la evaluación técnica y económica de este tipo de iniciativas.

La Escuela de Ingeniería Forestal de la Universidad Mayor, a través de su Centro de estudios de recursos naturales OTERRA, han elaborado una propuesta técnica para

¹ Cabe recordar que aunque biomasa y carbono capturado son dos conceptos distintos que hay que diferenciar, la evaluación del primero contribuye al conocimiento del segundo. Según Singh y Sandipan (2012) el contenido de carbono capturado suele oscilar entre un 47,5 y 50 % de la biomasa seca.

² Se escanean dos líneas durante el vuelo para aprovechar ambas pasadas de la avioneta, y por ese motivo aparecen dos en la planificación. Pero para el objeto de este proyecto tan solo se usará una imagen de las dos registradas, la imagen situada hacia poniente.

implementar un proyecto que contribuya a cumplir las metas que CONAF se ha planteado en esta temática.

En este contexto se realiza el presente proyecto final de máster que pretende desarrollar una metodología que permita estimar la biomasa contenida en los bosques nativos de la región mediterránea chilena.

1.1 Objetivos

La gestión correcta de los recursos forestales obliga a conocer de forma precisa la cantidad en que éstos están disponibles, cómo se encuentran distribuidos, cuál es el potencial productivo y cuáles son las restricciones para su utilización. Obtener tal información en bosques mediterráneos resulta de gran dificultad debido a la tendencia de crecimiento arbustivo y portes erráticos de los árboles. Oterra trabaja paralelamente en la caracterización del bosque nativo chileno de referencia, es decir, en su estado óptimo de madurez, por lo tanto, conocer el estado de desarrollo de un bosque y su contenido de carbono en un determinado momento, permite estimar el potencial productor de carbono si se llevaran a cabo las tareas silvícolas orientadas a llevar al bosque mediterráneo chileno a su estado de desarrollo óptimo.

Por lo tanto el objetivo general de este proyecto final de máster es:

Desarrollar una metodología para la estimación de carbono capturado en bosques mediterráneos chilenos.

Los objetivos del trabajo se dividen en tres bloques claramente diferenciados.

- Primero: Estimar del carbono capturado en unos cuantos individuos recogiendo datos de campo. Aplicando las funciones alométricas se obtiene el conjunto muestral de campo de datos de carbono capturado.
- Segundo: Capturar y procesar una imagen hiperespectral para transformar los niveles digitales en información de reflectividad.
- Tercero: Obtener índices de vegetación que permitan finalmente estimar el contenido de carbono capturado en las especies que conforman el bosque mediterráneo mediante correlaciones estadísticas.

1.2 Justificación

La Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) y el interés por el origen de la pérdida de los sumideros de carbono terrestre están impulsando la investigación y el desarrollo de métodos para la contabilidad del carbono en los ecosistemas forestales (UNFCCC, 1997). En este sentido, la integración de la teledetección y la generación de modelos generan información espacialmente explícita sobre el almacenamiento y flujo del carbono (Turner et al., 2004).

En este sentido Rosenqvist et al. (2003) describe el potencial de la teledetección en las investigaciones relacionadas con secuestro de carbono en el marco del Protocolo de Kioto. En primer lugar determina que la teledetección otorga un suministro de observaciones

sistemáticas sobre el cambio y cuantificación en la cobertura de suelo, 2) apoya a la creación de una línea de base sobre el stock de carbono; 3) cuantifica las reservas de biomasa y los cambios asociados a la misma, y vigila determinadas fuentes antropogénicas de CH₄ (metano), donde las 3 primeras potencialidades están asociadas directamente al secuestro de carbono.

Estudios con imágenes satelitales (Fazakas, 1999; Mukkonen, 2007; Watts, 2009), imágenes de RADAR (Fransson, 1999; Balzter, 2001; Rauste, 2005) e imágenes LIDAR (Patenaude, 2004, Persson, 2002; Chen, 2012) proporcionan información espacial sobre la discriminación de la cobertura de suelo para controlar la deforestación e información sobre el stock de carbono a través de la superficie de los bosques (Patenaude, 2005).

También las imágenes hiperespectrales, es decir aquellas que poseen cientos de bandas espectrales contiguas, han mostrado potencial para la estimación de variables biofísicas del bosque e incluso para la identificación de especie del dosel (Kalácska 2007). El potencial analítico que ofrecen estas imágenes es obvio, y una de sus grandes posibilidades es el procesamiento en derivadas de las curvas espectrales, que permite reducir la influencia de interferencias (Teledet 2013).

Además, el empleo de un mayor número de bandas que captan regiones espectrales más angostas (imágenes hiperespectrales) evita la saturación del índice de vegetación, con resultados prometedores (Kalácska 2007).

Por otro lado Patenaude (2005) señala que la resolución espacial de los sensores para la estimación de stock de Carbono y discriminación entre coberturas de suelo es predominantemente relevante. Así mismo la resolución espectral en el caso de los sensores ópticos permite analizar químicamente el área foliar y contenido de agua de la vegetación, proporcionando así una mejora de los datos para estudios de biomasa y cobertura de suelo; parámetros bases para la estimación de carbono.

1.3 Antecedentes

En relación a los sensores ópticos Muukkonen et al. (2007) hace una estimación de la biomasa sobre la base de datos del inventario forestal de Standwise y datos de los satélites ASTER y MODIS con la finalidad de verificar los inventarios de carbono en Finlandia. Fazakas et al. (1999) estiman la biomasa forestal regional y volumen de madera a partir de datos auxiliares en imágenes LANDSAT TM en el centro de Suecia. El RMSE obtenido para un área de 510 hectáreas de bosques fue de un 8,7% para la estimación de biomasa y un 4,6 % para la estimación de volumen de madera. Además Sivanpillay et al. (2005) estima la cubierta forestal en Texas con imágenes LANDSAT ETM y Watts et al. (2009) investiga sobre el monitoreo de las prácticas de la tierra de cultivo con la finalidad de establecer el secuestro de carbono en el sector de Montana con imágenes LANDSAT TM.

Sin embargo, de acuerdo a lo anterior, Koch (2010) señala que existe una mejor evaluación y mapeo de la biomasa con datos de imágenes hiperespectrales. En este sentido muchos trabajos de investigación analizan índices de vegetación y clasificación de especies (Buddenbaum et al., 2005; Dian et al., 2009; Dudení et al., 2009; Debba et al., 2009; Odagawa and Okada, 2009; Apan et al., 2009) para la estimación de biomasa.

Schlerf et al. 2005, Schlerf (2006), Darvishzadeh et al. (2008), Huber et al. (2008) y Xue & Yang, (2008) presentan algunas de las publicaciones en que se ha analizado la información bioquímica y el índice de área foliar a partir de imágenes hiperespectrales y todos ellos confirman que existe una fuerte relación entre determinados índices de vegetación y el estado bioquímico de los árboles.

García-Martín (2009) desarrolla una metodología que estima la biomasa residual de bosques de coníferas en la región de Teruel (España) en la cual mediante ajustes de regresión relaciona medidas de la vegetación tomada en campo con la información de imágenes satelitales de Landsat 5 TM.

Singh (2012) Investiga la relación entre la biomasa aérea y 6 índices de vegetación (obtenidos de la información de una imagen Landsat TM), e identifica el índice de vegetación que mejor se correlaciona con la biomasa. En el área de estudio de 390 km² toma muestras de 33 parcelas aleatorias para calcular la biomasa utilizando las ecuaciones alométricas de las especies presentes, que se relacionan con sus variables biofísicas como DAP, altura, etc. En el estudio se observa una correlación significativa entre la biomasa y los índices de vegetación.

Por otro lado, Le Maire et al, (2008) describe un conjunto de índices para extraer la biomasa de hojas del dosel a partir de datos de Hyperion, sin embargo, la evaluación de la biomasa sub aérea se dificulta sobre la base de los datos hiperespectrales.

En general el uso de los datos hiperespectrales para la estimación de biomasa sobre el suelo es muy probable en conjunto con datos de otros sensores remotos. No obstante, una estimación directa de la biomasa aérea basada exclusivamente en datos hiperespectrales no es probable especialmente en lugares de un alto porcentaje de biomasa (Koch, 2010).

Dong, (2003) señala la importancia de los bosques en el ciclo del carbono y la necesidad de cuantificar, medir y gestionar la captura de carbono en los bosques en donde se estudia la relación entre los índices de verdor obtenidos de imágenes de satélite y estimaciones de los inventarios de bosques y su contenido de carbono en la biomasa total y evaluar la habilidad de los modelos de regresión que representan la relación entre biomasa y NDVI con imágenes del sensor AVHRR.

2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio tiene una extensión de unas 100 ha. Está localizado en la Sierra de Ramón en las estribaciones de la Cordillera de los Andes, al oriente de la ciudad de Santiago de Chile, en un paraje llamado San Carlos de Apoquindo, el centro del área de estudio está localizado en latitud 33° 24' 11" y longitud 70° 29' 37". La altitud media es de 1050 msnm y tiene una pendiente media de entre 7 y 10%.

Se ha elegido esta zona por ser representativa del bosque mediterráneo chileno y por la cercanía a la ciudad de Santiago, lo que conlleva facilidades tanto para la toma de datos en campo como para la captura de la imagen hiperespectral. El mapa de localización de la zona de estudio se puede ver en el anexo I.

2.1 Condicionantes naturales

Las principales características climáticas que presenta la Región Metropolitana corresponden al tipo "mediterráneo", de estación seca larga y con un invierno lluvioso. La temperatura media anual es de 13,9°C, en tanto que el mes más cálido corresponde al mes de enero, alcanzando una temperatura de 22.1°C, y el mes más frío corresponde al mes de julio con 7,7°C. El sello característico lo constituyen las lluvias, cuyas variaciones permiten destacar condiciones bastantes precarias alcanzando promedios anuales de 356,2

mm. Las precipitaciones decrecen desde la costa hacia la depresión intermedia, para aumentar nuevamente en la cordillera de los Andes; originándose de esta manera líneas bioclimáticas generales de la región y de la zona central de Chile (Chile s.f. 2013).

La presencia de la Cordillera de la Costa y el alejamiento del mar son los principales factores que producen las características de continentalidad del clima de la región de Santiago (Chile s.f. 2013).

A partir de los 500 metros de altura se pueden dar precipitaciones mayores (entre 400 y 100 mm) pudiendo se encontrar el bosque esclerófilo mediterráneo chileno.

2.2 Condicionantes históricos y antrópicos

Debido al alto grado de población que presenta la región el paisaje se ha visto alterado, disminuyendo notablemente la vegetación natural permaneciendo sólo en las laderas y faldeos cordilleranos. La agricultura y las plantaciones forestales de especies exóticas como eucalipto, álamos y pino han transformado el paisaje agrícola de la región.

En los Siglos XVII y XVIII, parte importante de los bosques mediterráneos fue afectada por la recolección de leña y la urbanización, pero los procesos de transformación más importantes comenzaron a generarse en el Siglo XVIII y comienzos del XIX (los llamados siglos trigueros y del cebo), producto de la expansión masiva del cultivo de cereal en grandes superficies del mediterráneo chileno. Simultáneamente comenzó también una importante expansión del laboreo minero, con su consecuente demanda creciente de leña y carbón para sus procesos (Ramírez 2007).

El desgaste y degradación de los suelos cultivados con cereales durante décadas, generaron una baja en las productividades, y un progresivo abandono de estas zonas por parte de la actividad agrícola, dando paso a la formación de los llamados “espinales”, o matorrales de *Acacia caven*, forma sucesional del bosque mediterráneo que hoy cubre una importante superficie de la zona central (Cruz et al., 2008).

El desarrollo de la tecnología y el uso de combustibles fósiles en la minería, disminuyó en parte la presión sobre el bosque mediterráneo a inicios del Siglo XX, sin embargo, nuevos agentes de presión tales como la sustitución por plantaciones forestales, la ganadería extensiva, los incendios, la introducción y expansión masiva de especies nocivas (lagomorfos, herbáceas, entre otras), los proyectos de infraestructura y energía, y la habilitación de suelos para la agricultura, comenzaron a extenderse con fuerza en la zona central de Chile, con la consecuente presión y degradación de su vegetación natural (Flores y Díaz 2007).

3 MATERIAL

- Sensor (*Hyspex VNIR-1600 HSI*)

El sensor hiperespectral *Hyspex VNIR-1600*© es propiedad del Centro de Estudios de Recursos Naturales OTERRA perteneciente a la Escuela de Ingeniera Forestal de la Universidad Mayor. Es un escáner que cuenta con 1.600 detectores de voltaje arreglados linealmente dentro de un campo de visión instantáneo de 17°, lo que lo faculta para obtener

imágenes con una resolución espacial submétrica aun sobrevolando un área a miles de metros sobre la superficie. Por otro lado, el instrumento posee una sensibilidad espectral que abarca todas las regiones visibles y la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético (desde los 400 hasta los 1.000 nm). Este rango espectral es muestreado en intervalos contiguos de 3,7 nm, lo que resulta en la obtención de imágenes con una resolución espectral de 160 bandas. Cada banda cuantifica la radiación reflejada en una escala de 65.536 valores, en unidades de $W/m^2 \times nm \times sr$, lo que equivale a una resolución radiométrica de 16 bits.

La adquisición de datos de *Hypex VNIR-1600* se lleva a cabo instalado el sensor en un avión. Para ello hace falta una planificación operativa cuidadosa para recoger la imagen hiperspectral de manera eficiente. Los componentes que integran el sistema operativo para la recogida de la imagen son los siguientes:

- El sensor *Hypex VNIR-1600* descrito anteriormente se conecta a un PC de abordo a través de un cable de imagen y un cable de energía. Al sensor se le acopla un expansor que aumenta el ángulo de visión de 17° a 34°. Este aumento del ángulo incrementa la superficie de tierra registrada y permite una mayor velocidad del avión durante el vuelo.



Ilustración 1. Sensor Hypex VNIR-1600



Ilustración 2. Expansor del ángulo de visión.

- Pantalla táctil: Conectada al PC con un cable de energía y un cable USB. Desde esta pantalla se controla el software *HySpex* para introducir los parámetros de vuelo, iniciar y finalizar la captura de información.

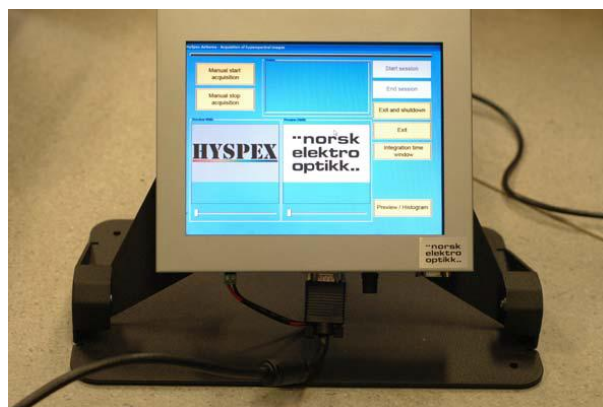


Ilustración 3. Pantalla táctil

- Unidad de medición inercial o IMU (inertial measurement unit). Este dispositivo mide e informa acerca de la velocidad, posición global y movimiento inercial del avión.
- Estabilizador de energía (iMAR. iPowBox-V2): Se conecta a la IMU para garantizar la estabilidad de voltaje emitido que permite la captura de información de manera ininterrumpida y estable.
- Antena GPS. la antena GPS envía información de posicionamiento a la IMU. Debe estar conectada directamente a ésta.



Ilustración 4. Antena GPS, estabilizador de energía e IMU.

- Ordenador de adquisición de datos HySpex: El sistema cuenta con un ordenador personalizado de alto rendimiento, capaz de recoger la información del sensor a alta velocidad y con los requisitos suficientes para soportar el software *hySpex*.
- Baterías: Se dispone de dos baterías. Una alimenta al estabilizador de energía y la otra al ordenador.

En la siguiente figura se representa de manera esquemática la conexión de cada uno de los elementos que conforman el sistema operativo.

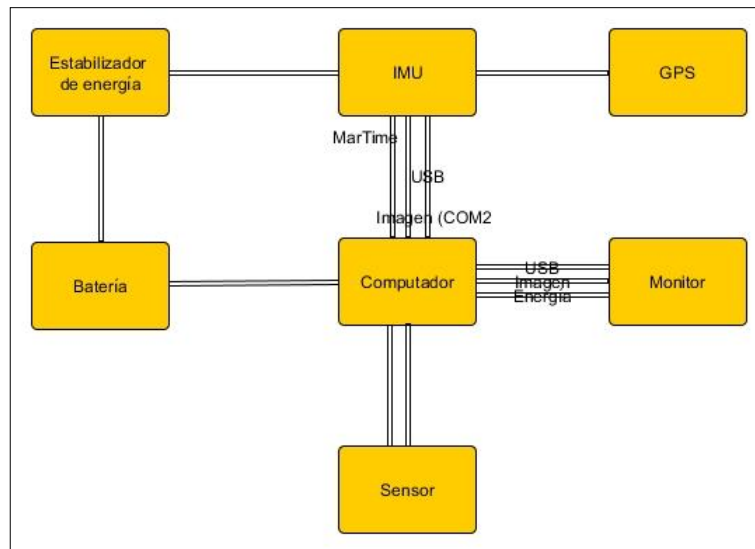


Ilustración 5. Esquema de ensamblaje del sistema de captura de imagen.

- Funciones alométricas de carbono secuestrado de cuatro especies, *Cryptocaria peumus* (Peumo), *Quillaja saponaria*, (Quillay), *Lithrea caustica* (litre), *Acacia caven* (espino).

El trabajo necesario para conocer la cantidad de carbono en un árbol es costoso y laborioso. A partir de las funciones alométricas se puede estimar la cantidad de carbono mediante la relación de la biomasa y otras variables fáciles de medir, como el diámetro a la altura del pecho (DAP), diámetro a la altura del cuello (DOC), diámetro a 1 metro (DAM), superficie de copa y altura entre otros.

Las funciones de volumen pueden dividirse en (Prodan et al., 1997; Emanuelli., 1999):

- Funciones de árboles individuales que entregan el volumen de un árbol en función de variables explicativas medidas en el árbol como diámetro a la altura del pecho, altura total, altura comercial o factor de forma.
- Funciones agregadas que entregan el volumen de un rodal directamente a partir de variables independientes relacionadas con el rodal como área basal por hectárea, número de árboles por hectárea, altura dominante u otras;
- Funciones locales parametrizadas: son una mezcla entre las de árboles individuales y las agregadas y entregan el volumen de un árbol a partir de variables relacionadas tanto con el rodal, como con los árboles que lo componen.

Oterra viene desarrollando funciones alométricas de árboles individuales para las principales especies en el bosque mediterráneo nativo de Chile como son *Cryptocaria peumus* (Peumo), *Quillaja saponaria* (Quillay), *Lithrea caustica* (litre), *Acacia caven* (espino). Son funciones de carácter local, ya que las funciones son de aplicación limitada al área concreta para que se mantenga la relación. Las funciones para cada una de las especies relaciona la biomasa con una sola variable dendrométrica que va a ser el DAP, DAM o el DAC según el caso, aunque durante el muestreo de campo se recoge información de altura y diámetro de copa, ya que ayudan a investigar sobre nuevas funciones que puedan tener mejor correlación.

Mediante un proceso en laboratorio de calcinación de las muestras recogidas durante el trabajo de elaboración de estas funciones (tronco, ramas y hojas), Oterra determina que el 50% de la biomasa es carbono.

Tabla 1. Funciones alométricas

Especie	Ecuación alométrica	R ²
<i>Acacia caven</i> (espino)	$KG_{\text{biomasa}} = 0.3468 \times \text{DAM}^{2.0835}$	0.9421
<i>Lithrea caustica</i> (litre)	$KG_{\text{biomasa}} = 0.1054 \times \text{DAC}^{2.2569}$	0.8414
<i>Cryptocaria peumus</i> (Peumo)	$KG_{\text{biomasa}} = 1.2621 \times \text{DAP}^2 - 13.161 \times \text{DAM} + 56.738$	0.9300
<i>Quillaja saponaria</i> , (Quillay)	$KG_{\text{biomasa}} = 0.3278 * \text{DAM}^{2.2043}$	0.9500

– Material de trabajo en campo.

Para el desarrollo del trabajo de campo se han utilizado las siguientes herramientas:

- Mapa impreso: Se imprime un mapa de la zona de estudio que contiene una imagen de alta resolución de la zona de estudio, extraída de *Google Earth Pro*. La utilidad de este mapa busca localizar en campo las copas de los árboles que se van a medir.
- GPS *eTrex 20*: Es un dispositivo GPS de mano que se utiliza para la georeferenciación de los árboles medidos.
- Forcípula de brazo móvil: Con la cual se mide el diámetro a un metro y el diámetro del tocón.
- Cinta métrica: Ésta es usada para medir el diámetro de copa de los árboles.

4 METODOLOGÍA.

Se ha de programar un vuelo para la captura de la imagen hiperespectral de la zona de estudio. Una vez realizados los trabajos de procesamiento de la imagen, ésta se relaciona con 7 índices de vegetación por combinación de las distintas bandas hiperespectrales en las regiones del visible y del infrarrojo.

Por otro lado, se realiza la toma de datos en campo. Esta toma de datos consiste en recoger medidas dendrométricas de las principales especies arbóreas, de las cuales se posee la función alométrica que estima su biomasa. Según Singh y Sandipan (2012) el contenido de carbono capturado suele oscilar entre un 47,5 y 50 % de la biomasa seca. Los análisis de laboratorio por calcinación de hojas, ramas y troncos que se realizaron para el cálculo de estas funciones estiman en un 50 % de carbono capturado sobre la biomasa seca.

Se analiza mediante un análisis de regresión lineal cuál de los índices de vegetación presenta una correlación más fuerte con los valores de biomasa estimados en campo. El grado de relación se valora a partir del Coeficiente de correlación de Pearson R. De esta manera se genera un algoritmo que posteriormente sirve para la estimación de la biomasa para el resto de la escena de la imagen hiperespectral.

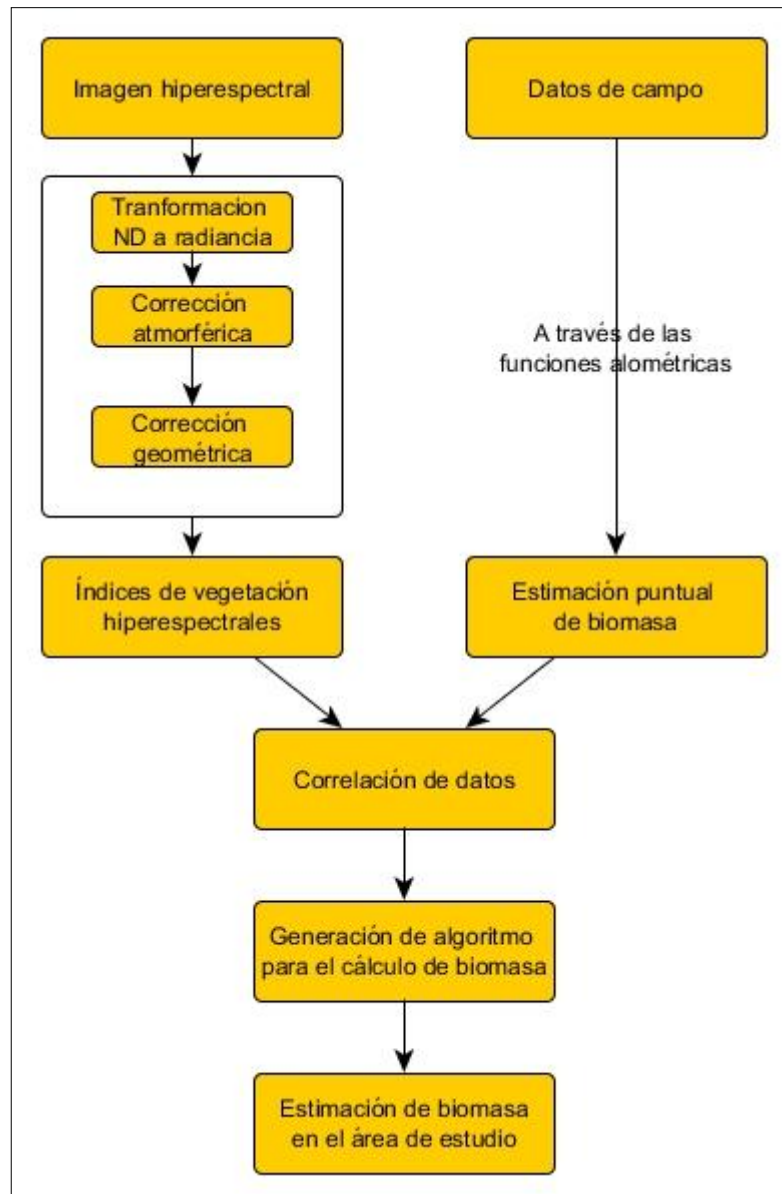


Ilustración 6. Esquema metodológico.

4.1 Datos de campo.

Se miden en el área de estudio un total de 82 árboles, de los cuales se extrae información de cada uno de ellos de los siguientes parámetros: especie, diámetro a la altura del cuello o tocón (DAC), diámetro a 1 metro de altura (DAM), diámetro de la copa y altura total. El resumen de los datos se puede consultar en el anexo II 'Datos de campo'.

Durante la toma de datos muchos de los individuos presentan varios vástagos por individuo, por lo tanto en los valores de DAC o DAM se da el valor de la media aritmética.

4.1.1 Procesado de los datos de campo

En ArcMap se edita un shape de entidades poligonales, donde los polígonos representan la copa de cada uno de los 82 árboles. A medida que se edita cada polígono se va creando también la tabla de atributos asociada a este shape, en la cual figuran los

campos: DAC, DAM, diámetro de copa; y los datos derivados de las funciones alométricas: Biomasa y carbono capturado.

De las muestras seleccionadas 5 corresponden a la especie espino, 37 a litre y 40 a quillay. La distribución de las muestras en el área de estudio se puede ver en el mapa del anexo II.

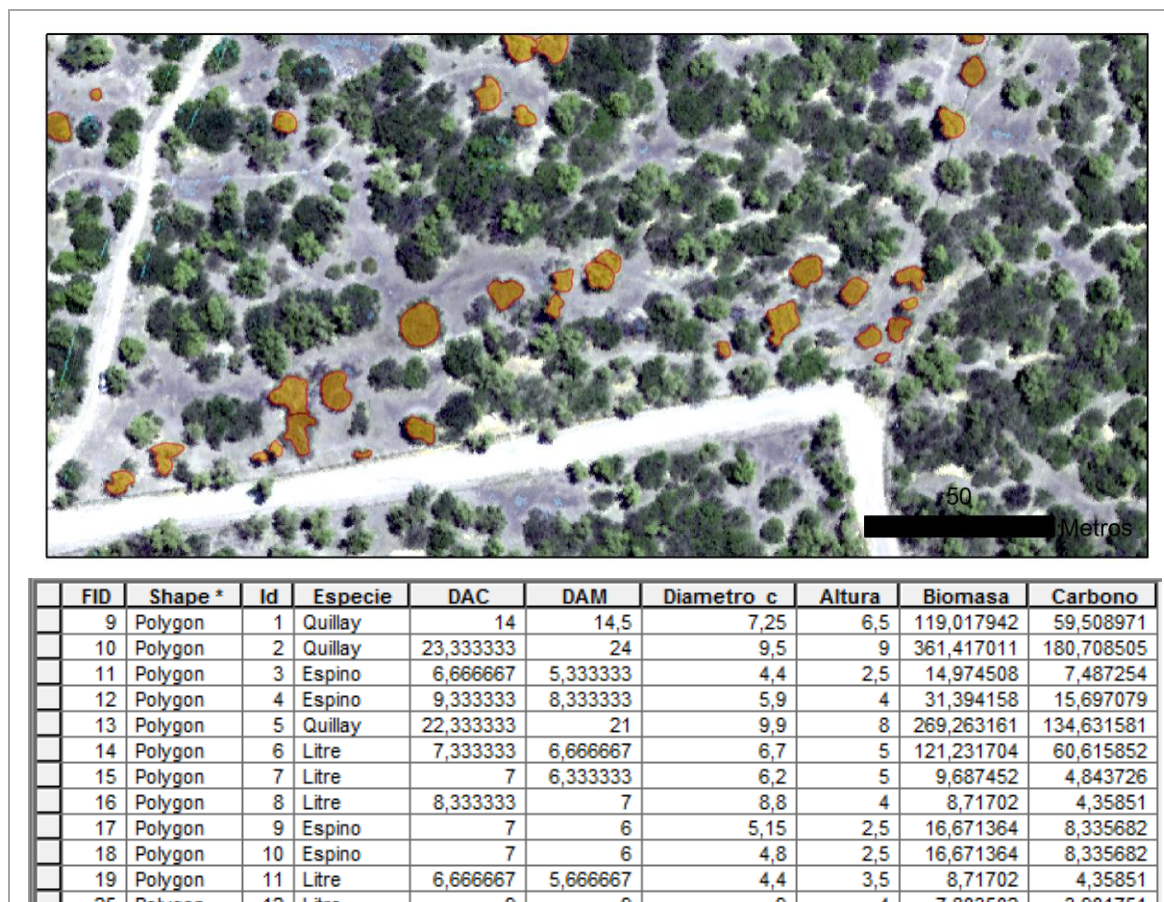


Ilustración 7. Shape editado con los datos de campo.

4.2 Trabajo sobre imagen hiperespectral.

4.2.1 Planificación del vuelo

Para la planificación del vuelo se dispone de dos premisas de partida: el área de interés y la resolución del píxel proyectado que, para este caso, es de 0.30 metros.

En el manual de especificaciones técnicas del sensor encontramos tablas donde podemos consultar parámetros necesarios para la planificación del vuelo y obtener una resolución aproximada de 0.30 metros de píxel. En este caso tomamos nota en estas tablas de:

- Altura de vuelo = 800 metros
- Ancho de escena = 478 metros

Se hace uso de *Google Earth (GE)* para comenzar la planificación. El método es el siguiente:

- Situar en el centro de la pantalla la zona de estudio, hacer zoom hasta situarnos a una altura de 800 metros sobre el terreno (*GE* da esta información).
- Dibujar las líneas de vuelo. Se planifican dos líneas de vuelo², para dibujarlas hay que tener en consideración que el ancho de escena que recoge el sensor es de 478 metros, y para que no queden huecos entre las pasadas del sensor, éstas deben presentar un solape entre ellas (por recomendación de expertos se considera aproximadamente un 50% de solape). La línea hacia poniente se llamará 'X' y la línea situada hacia la cordillera recibirá el nombre de 'Y'.
- Recoger información de los 'puntos guía' que, serán de gran importancia para dirigir las trayectorias del aeroplano. Estos puntos son los que habrá que dar al piloto del aeroplano para el correcto escaneo del terreno. En cada línea de vuelo se deben recoger 4 puntos:
 - Entrada: Es el punto donde se comienza a registrar información con el sensor, se debe localizar 500 metros antes de llegar a la zona de estudio.
 - Alineamiento de entrada: Este punto se localiza en la misma línea de la trayectoria de captura, a 1000 metros antes de alcanzar el punto anterior. El paso por este punto garantiza la correcta entrada en la trayectoria deseada.
 - Salida: Al paso por este punto, se puede parar el escaneo del sensor. Se localiza 500 metros después de haber dejado atrás la zona de interés.
 - Alineamiento de salida: Garantiza que la trayectoria del sensor no se desvíe del trazado planificado, además da margen al piloto para girar y encarar las siguientes líneas de escaneo.

En el anexo III se ha editado la cartografía del plan de vuelo, donde se muestran las trayectorias del avión sobre el área de estudio que aparece como un rectángulo por pasada. Se indica el punto inicial y final de adquisición de datos.

4.2.2 Captura de la imagen

La escena fue capturada el 30 de enero de 2013 entre las 14:30 horas y las 15:30 horas. Las condiciones atmosféricas eran de nula nubosidad sobre el área de estudio. El vuelo se realizó a una altura de 800 metros sobre el nivel del suelo lo que permite la obtención de imágenes con una resolución espacial de aproximadamente 30 centímetros de píxel.

Unos días previos a la realización del vuelo para la captura de la imagen se ensambla el equipo del sensor y se comprueba su funcionamiento.

Se instala el sensor en el avión. En la base del avión se coloca la placa estable sobre la que se coloca el sensor, la IMU y el estabilizador de energía. Se coloca la antena GPS en el

² Se escanean dos líneas durante el vuelo para aprovechar ambas pasadas de la avioneta, y por ese motivo aparecen dos en la planificación. Pero para el objeto de este proyecto tan solo se usará una imagen de las dos registradas, la imagen situada hacia poniente.

dorso del avión, y se distribuye en el escaso espacio disponible las baterías y el ordenador del sistema. La pantalla táctil se hace llegar hasta la posición del copiloto, desde donde se controlará el sistema.

Para la correcta recogida de los datos inerciales del vuelo hay que introducir los siguientes datos en el software del IMU:

- Distancia entre la IMU y el sensor.
- Distancia entre la IMU y la antena GPS.

La siguiente información, extraída de la planificación del vuelo, hay que suministrársela al piloto del avión:

- Las coordenadas para cumplir con las distancias de alineamiento y el comienzo y final de la toma de datos. Estas coordenadas son introducidas en el sistema de navegación del avión.
- Altura de vuelo
- Velocidad del avión.

Antes de comenzar con el software de captura de la imagen 'HySpex' se comprueba que el sistema recoge correctamente información GPS e inercial.

A continuación se abre el programa de vuelo *HySpex*. El programa cuenta con dos ventanas principales: La ventana de captura de datos y la ventana de ajustes (Ver ilustraciones 8, y 9).



Ilustración 8. Ventana de captura de datos

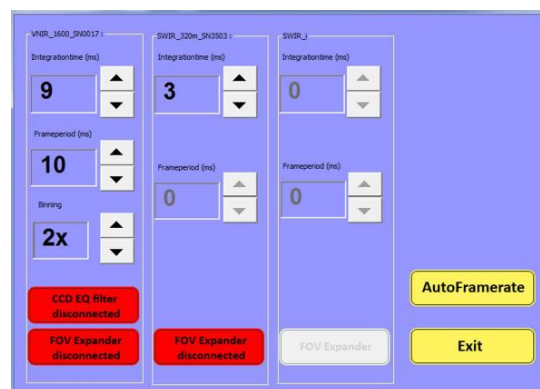


Ilustración 9. Ventana de ajustes

En la ventana de ajustes se introduce el tiempo de integración que, por recomendación del fabricante, el óptimo es de 7.5 ms. para el estudio de la vegetación. En el anexo (IV) se adjunta la tabla de los tiempos de integración para este sensor. Con los valores de tiempo de integración y elevación sobre el suelo (800 metros), extraemos la velocidad del avión. La velocidad debe ser 287.1 km/h para este vuelo.

En esta ventana es posible también seleccionar el factor '*Binning*'. Este es un factor de resolución espacial, que para el caso del presente estudio es '2x' puesto que al instalar el expansor en el sensor se reduce la resolución espacial a la mitad.

Una vez introducidos los datos de ajuste de la cámara, se inicia en 'ventana de captura de datos' una nueva sesión, donde se indica el nombre y carpeta de la imagen a capturar.

Se comienza la adquisición de datos al paso del punto 'entrada' de la línea de vuelo (500 metros antes de entrar en la zona de estudio), a partir de este punto se va almacenando la información en la carpeta indicada; y se detiene la adquisición en el punto 'salida' de la línea de vuelo. Estos puntos se calcularon en la planificación del vuelo y se pueden consultar durante el vuelo en el navegador del avión.

Cuando se termina con el itinerario descrito en la planificación del vuelo, se cierra la sesión. En la carpeta donde se ha almacenado la imagen se ha generado la imagen con datos brutos: 'imagen_raw.img'.

4.2.3 Transformación a radiancia

La radiancia es una magnitud física que no parametriza los efectos producidos por la atmósfera ni la topografía del terreno, por ello no puede ser utilizado para la modelización de variables físico-químicas del terreno (Cano et al., 2013).

El sensor utiliza el software de post-procesado *HySpex RAD* para la calibración radiométrica de las imágenes que recoge. Este proceso se realiza sobre el mismo PC del sensor, el cual tiene los coeficientes de Gain y Offset necesarios para la conversión de los niveles digitales en niveles de radiancia en $[W/(m^2*sr*nm)]$. La imagen con niveles de radiancia que resulta del proceso va a recibir el nombre de 'imagen_raw_rad'.

4.2.4 Corrección atmosférica y geométrica.

La corrección atmosférica se realiza mediante la aplicación de algoritmos en los que intervienen las condiciones de observación e iluminación, la densidad de la columna de agua y la neblina entre otros parámetros. A través de la corrección atmosférica se obtienen una imagen en valores de reflectividad, cociente entre la energía reflejada y la energía incidente (Cano et al., 2013).

La corrección geométrica permite la ubicación de cada píxel en el punto exacto de la superficie terrestre al que pertenece. Para ello se utilizan los datos generados por el sistema de navegación, que registra el posicionamiento del sensor (latitud, longitud y elevación) y el movimiento inercial del avión (cabeceo, aleo y bandeo) en cada momento de la adquisición. Tras aplicar las correcciones se obtiene una imagen en valores de reflectividad y ubicada espacialmente (Cano et al., 2013), lo que permitirá trabajar con esta información para el cálculo de los índices de vegetación y visualizar la información correctamente.

A lo largo de este flujo de trabajo se utiliza el siguiente software: ENVI (preparación de un DEM), ATCOR 5.1 (corrección atmosférica) y PARGE 3.0 (corrección geométrica).

ATCOR permite calcular los valores de reflectancia a nivel del suelo, es decir, elimina los efectos atmosféricos en las imágenes del sensor. El flujo de trabajo genera una imagen de reflectancia a nivel del suelo, corregido por sus características del estado atmosférico (tipo aerosol y agua vapor) y los efectos del terreno.

Para la corrección geométrica se utiliza PARGE (*Parametric Geocoding*) que es un software de orto-rectificación y geocodificación para datos de escáneres ópticos aerotransportados. Se lleva a cabo la orto-rectificación de las imágenes escaneadas mediante un modelo digital de elevación y sobre la base de los parámetros de vuelo, tales como la posición del GPS y los ángulos de movimiento durante el vuelo. El programa está optimizado para instrumentos hiperespectrales aéreos.

– Preparación del DEM:

Para la obtención del DEM se recurre a ASTER GDEM³ en su página web <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>, donde se busca la zona del área de estudio y se descarga.

La preparación del DEM se lleva a cabo con el software ENVI5:

- El tamaño del DEM abarca una zona mucho más amplia de la que interesa, por lo que se procede a realizar un recorte de éste para la zona de estudio y de esta manera agilizar las operaciones.
- Conversión de los parámetros de proyección: En ENVI *map* → *Convert map projection*. Se establece el sistema de coordenadas UTM, datum WGS84, huso 19 sur.
- Cambio de tamaño del píxel: El tamaño del píxel del archivo ASTER original es de 23 x 30 metros, por lo que se transforma en un píxel cuadrado de 30 metros de lado, mediante la herramienta *Resize data (Spatial/Spectral)* en *basic tools*.

Conviene hacer una planilla de vuelo donde introducir los parámetros relativos al vuelo y que son requeridos por ATCOR durante el proceso (Anexo V). Sobre esta planilla también se introducen los datos derivados por ATCOR y que serán requeridos en PARGE.

– Cálculo del ángulo de la escena (*Fligh heading scene*) en PARGE:

En PARGE se importa la imagen con niveles de radiancia 'imagen_raw_rad' desde *file/import/Hypex* data. El software solicita para la importación dos archivos: el archivo generado por la IMU donde se encuentran los datos de posicionamiento y movimiento inercial de la plataforma; y el archivo estándar, propio del sensor.

Se debe incorporar el DEM anteriormente reproyectado. En *DEM/import/ENVI* (se ingresa el DEM reproyectado).

En la pestaña *control/Display fligth path on DEM*. se visualiza la línea de vuelo sobre el DEM y se puede calcular el ángulo de la escena de vuelo (de manera manual).

³ ASTER GDEM, es un proyecto desarrollado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), con la finalidad de construir con Modelo de Elevación Digital de todo la superficie terrestre

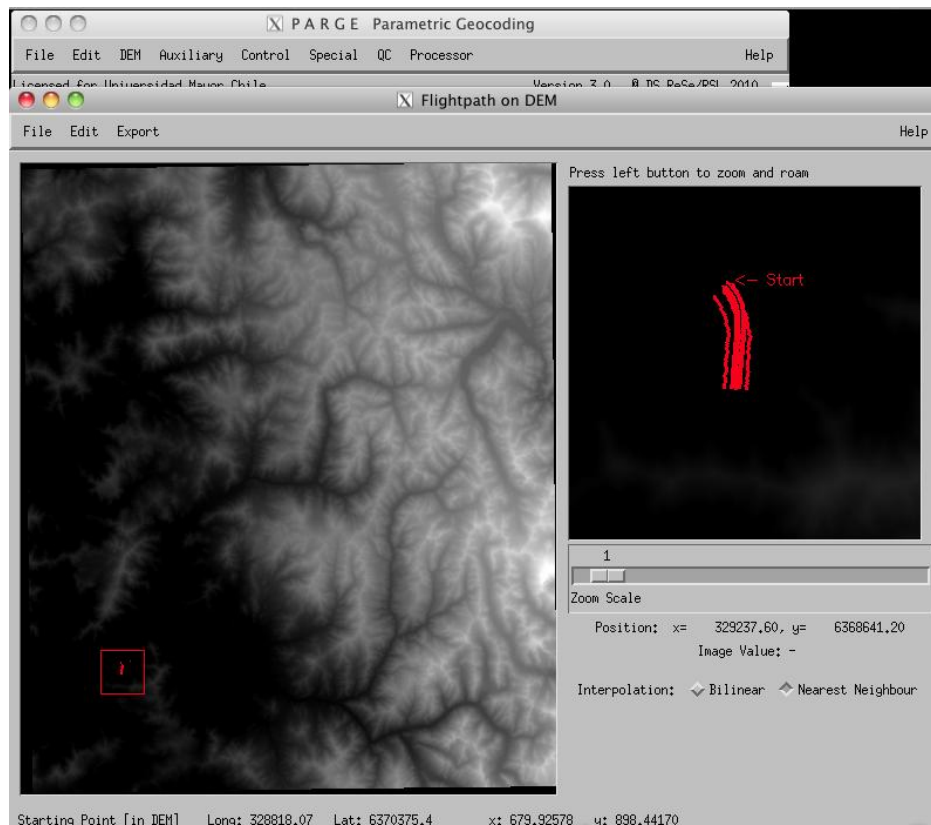


Ilustración 10. Cálculo del ángulo de la escena (*Fligh heading scene*) en PARGE

– Cálculo del ancho de escena en PARGE:

El ancho real de la escena se calcula con el objetivo de conocer el tamaño del píxel real, que varía del tamaño de píxel estimado en la planificación de vuelo. Para ello se debe realizar una corrección geométrica con una sola banda, más adelante se hará sobre las 160 bandas del sensor, pero en esta ocasión se hace sobre una sola con el fin de agilizar el proceso, ya que se pretende conseguir el tamaño del píxel definido.

Primero se vuelve a importar la imagen en niveles de radiancia File/import/Hypex (imagen_raw_rad.img) y el MDE reproyectado DEM/IMPORT/ENVI (se ingresa el DEM reproyectado).

En PARGE se utiliza el *IGM main Processor* para crear una mapa base de la geometría de la escena.

A continuación se utiliza la herramienta *Geocoding IMG Cube Rectification*. Se introduce el mapa de geometría de la imagen recién creado y el mapa con los niveles de radiancia. Se indica que ejecute el proceso sobre una sola banda (rango de bandas de 80 a 80 p.e), por cuestiones de agilizar el proceso, como ya se ha comentado. En el apartado 'tamaño del píxel' se deja el valor por defecto, ya que aun no se sabe el tamaño del píxel, sin embargo cuando se haga posteriormente la corrección geométrica de las 160 bandas se ingresa el tamaño de píxel real.

De esta manera se obtiene la imagen (con una sola banda) corregida geoméricamente. Se debe abrir sobre ENVI para calcular el ancho de escena.

Esta imagen presenta una forma sinuosa debido al movimiento del sensor durante la captura. Directamente en ENVI se hacen mediciones (manualmente) del ancho de escena en el área de estudio y se obtiene un valor promedio. En este caso se estima que el ancho de escena promedio es de 512 metros.



Ilustración 11. Corrección de una banda para estimación del ancho de escena.

Teniendo en cuenta que el sensor tiene 1600 detectores de información alineados, el tamaño real del píxel queda definido a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Tamaño real del píxel} = \frac{\text{ancho de escena (m)}}{n^{\circ} \text{ de detectores}} = \frac{512}{1600} = \mathbf{0.32 \text{ metros}}$$

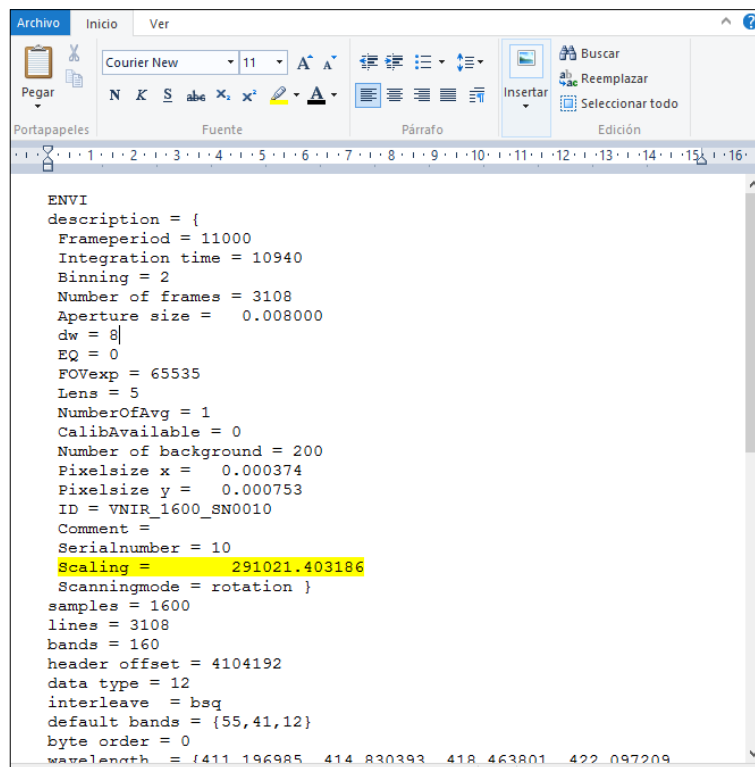
- Cálculo del ángulo de elevación solar, acimut y cenit.

Se carga la imagen con valores de radiancia 'imagen_raw_rad' (Herramienta de ATCOR en *tools* → *Solar Zenith an AzimuthK*). Se ingresan los datos de fecha, hora, latitud y el programa calcula la siguiente información:

- Elevación solar: 45.3°
- Acimut Solar: 81.5°
- Cenit solar: 44.7°
- Modelo atmosférico estimado: Desértico
- Visibilidad: 21 km.

- Corrección atmosférica:

Previamente hay que generar un '*archivo de calibración*' que será requerido durante el proceso en ATCOR. Debemos saber el dato del parámetro '*Scaling*' que se encuentra en el archivo de cabecera de la imagen cruda.



```

ENVI
description = {
  Frameperiod = 11000
  Integration time = 10940
  Binning = 2
  Number of frames = 3108
  Aperture size = 0.008000
  dw = 8
  EQ = 0
  FOVexp = 65535
  Lens = 5
  NumberOfAvg = 1
  CalibAvailable = 0
  Number of background = 200
  Pixelsize x = 0.000374
  Pixelsize y = 0.000753
  ID = VNIR_1600_SN0010
  Comment =
  Serialnumber = 10
  Scaling = 291021.403186
  Scanningmode = rotation }
samples = 1600
lines = 3108
bands = 160
header offset = 4104192
data type = 12
interleave = bsq
default bands = {55,41,12}
byte order = 0
wavelength = {411 196985 414 830393 418 463801 422 097209

```

Ilustración 12. Archivo de cabecera de la imagen cruda.

El dato '*Scaling*' resulta ser 291021.403186 y se toma nota. Con ello se calcula el siguiente cociente:

$$\frac{100}{\text{scaling}} = \frac{100}{291021.403186} = 3,43617 * 10^{-4}$$

Este valor hay que introducirlo en el archivo de texto estándar '*.cal*' que contiene la imagen cruda. Tal archivo contiene tres columnas. La primera posee los valores de las longitudes de onda de cada una de las 160 bandas en las que registra el sensor; una segunda columna con valores nulos; y una tercera columna con un valor de calibración por banda que debemos sustituir por el valor derivado del *scaling*.

408.477	0.00000	0.000343617
412.103	0.00000	0.000343617
415.730	0.00000	0.000343617
419.357	0.00000	0.000343617
422.984	0.00000	0.000343617
426.610	0.00000	0.000343617
430.237	0.00000	0.000343617
433.864	0.00000	0.000343617
437.491	0.00000	0.000343617
441.117	0.00000	0.000343617
444.744	0.00000	0.000343617
448.371	0.00000	0.000343617
451.998	0.00000	0.000343617
455.624	0.00000	0.000343617
459.251	0.00000	0.000343617
462.878	0.00000	0.000343617
466.505	0.00000	0.000343617
470.131	0.00000	0.000343617
473.758	0.00000	0.000343617
477.385	0.00000	0.000343617

Ilustración 13. Archivo de calibración para la corrección geométrica

Una vez se han recabado todos los valores 'input' se realiza la corrección atmosférica en ATCOR.

– Corrección atmosférica- ATCOR:

Se trabaja sobre la imagen de radiancia 'Imagen_raw_rad.img'. En el software se utiliza la herramienta **ATM. CORRECTION**. Los datos requeridos⁴ los encontramos en la planilla de vuelo (Anexo V) que se viene rellenando durante el proceso.

El resultado de la corrección atmosférica es una imagen que recibe el nombre de 'Imagen_raw_rad_atm'

– Corrección geométrica - PARGE:

Se realizan los mismos pasos descritos anteriormente en PARGE para el cálculo del ancho de escena, sin embargo esta vez se corrigen geoméricamente las 160 bandas y la imagen de entrada es 'imagen_raw_rad_atm'.

Con este proceso se obtiene la imagen 'Imagen_raw_rad_geo.bsq' y será la base para el cálculo de los índices de vegetación.

4.3 Índices de vegetación.

4.3.1 Descripción de los índices de vegetación:

Todas las plantas verdes absorben fuertemente la radiación electromagnética visible (0.4 a 0.65 μm), ello se debe a la absorbancia de los pigmentos de la hoja, principalmente clorofilas, xantofilas y carotenos, y reflejan fuertemente la radiación del infrarrojo cercano

⁴ Los datos requeridos para el proceso de corrección atmosférica en ATCOR son los siguientes: Fecha de captura de la imagen, geometría del vuelo y geometría solar (altura de vuelo, altura del terreno, ángulo de vuelo de la escena y ángulos de acimut y cenit solar), tipo de sensor, tamaño del píxel real, archivo de calibración, datos atmosféricos, tipo de aerosol, visibilidad estimada y vapor de agua.

(0.8 a 1.25 μm) debido a la dispersión de la energía recibida a esta longitud de onda por el mesófilo. Los índices de vegetación resaltan estas diferencias mediante operaciones matemáticas que generalmente implican la diferencia o el cociente de las bandas de una imagen multiespectral.

El conocimiento de la cantidad de clorofila en hoja de los vegetales es fundamental en estudios forestales. Por ello se han desarrollado distintos métodos para su estudio, proponiendo una gran variedad de índices que relacionan la reflectividad obtenida por sensores en distintas bandas (Haboudane et al., 2008).

Se realiza una búsqueda bibliográfica para concretar qué índices de vegetación se quieren utilizar. Se trata de escoger aquellos orientados a la discriminación de densidades de vegetación y de especies ya que es a partir de las cuales se ha calculado la biomasa localmente. La selección se basó en su robustez, base científica y la aplicabilidad general.

Como resultado de la búsqueda se analizan los siguientes índices:

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI₇₀₅).

Es una modificación del NDVI tradicional usado con imágenes multiespectrales. Su uso está destinado a trabajar con datos de muy alta resolución espectral, como es el caso de los obtenidos a partir de sensores hiperespectrales. Las aplicaciones incluyen la agricultura de precisión, vigilancia de los bosques, y la detección de estrés de la vegetación.

El NDVI₇₀₅ está definida por la misma fórmula que propuso Rouse et al. (1973) y que se calcula a partir de reflectancia en el rojo y el infrarrojo cercano:

$$NDVI = \frac{IRC_{800} - R_{670}}{IRC_{800} + R_{670}}$$

El valor de este índice varía de -1 y 1. El rango común de vegetación es de 0,2 a 0,9.

- Modified Simple Ratio Index (mSR₇₀₅):

Es una modificación del tradicional Simple Ratio (SR) que se suele aplicar en imágenes multiespectrales. Se diferencia de este en que utiliza todo el ancho de banda en el rojo e incorpora una corrección para la reflexión especular de la hoja (Sims 2002). Las aplicaciones incluyen la agricultura de precisión, monitoreo forestal, y la detección de estrés de la vegetación. El índice mSR₇₀₅ se define por la siguiente ecuación:

$$mSR = \frac{R_{750} - R_{445}}{R_{705} - R_{445}}$$

El valor de este índice varía de 0 a más de 30. La gama común para la vegetación es de 2 a 8.

- Modified normalized difference vegetation index (mNDVI₇₀₅).

Propuesto por Geltelson y Merzlyak (1996), es una modificación del NDVI que incorpora una modificación para la corrección de la reflexión especular de la hoja, disminuyendo la extremidad dada entre los valores de la firma espectral de la vegetación. El $mNDVI_{705}$ capitaliza la sensibilidad de la vegetación en el rojo a pequeños cambios en el contenido de follaje dosel, fracción de vacío, y la senescencia (Sims 2002). Las aplicaciones incluyen la agricultura de precisión, monitoreo forestal, y la detección de estrés de la vegetación. El índice $mNDVI_{705}$ se define por la siguiente ecuación:

$$mNDVI = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705} - 2R_{445}}$$

El valor de este índice varía de -1 a 1. El rango común de vegetación es de 0,2 a 0,7.

– Photochemical Reflectance Index (PRI):

El Índice de Reflectancia fotoquímica (PRI) es una medición de reflectancia que es sensible a los cambios en los pigmentos carotenoides (en particular pigmentos de xantofila) en el follaje vivo. Los pigmentos carotenoides son indicativos del uso eficiente de la luz fotosintética, o la tasa de absorción de dióxido de carbono por el follaje por unidad de energía absorbida. Como tal, se usa en los estudios de productividad de la vegetación y el estrés (Gamon y Penuelas 1992). Las aplicaciones incluyen la salud de la vegetación de matorrales siempre verdes, bosques y cultivos agrícolas previas a la senectud (Gamon et al., 1997). PRI se define por la siguiente ecuación:

$$PRI = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}}$$

El valor de este índice varía de -1 a 1. El rango común de vegetación es -0,2 a 0,2.

– Red Green Ratio Index (RG)

El Coeficiente de Verde Rojo (Relación de RG) es un índice de medición de la reflectancia que indica la expresión relativa del enrojecimiento de la hoja causado por el incremento de la antocianina respecto la clorofila. El Ratio de RG se ha utilizado para estimar el rumbo de desarrollo foliar en dosel. El índice de Relación de RG es un indicador de la producción y el estrés hoja, y también puede indicar la floración en algunas cubiertas.

Las aplicaciones incluyen estudios del ciclo de crecimiento de las plantas (fenología), detección de estrés dosel y predicción de rendimiento de los cultivos. Los resultados se presentan como la media de todas las bandas en la gama del rojo dividido por la media de todas las bandas en el verde. El valor de este índice varía de 0,1 a más de 8. El rango común de vegetación es de 0,7 a 3. (Thomas et al., 2005).

– Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI).

Es una simplificación de derivado de CARI hecha por Daughtry et al. (2000). Es un índice de vegetación que tiene potencial para predecir el LAI. Mide la profundidad de la absorción de clorofila a 670 nm comparándola con el pico de reflectancia en 550 nm y la

reflectancia en 700 nm. La proporción R700/R670 fue introducida por Kim et al. (1994) para minimizar los efectos del suelo.

$$MCARI = (R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550}) * \frac{R_{700}}{R_{670}}$$

– Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)

Propuesto por Rondeaux et al. (1996) es un índice de vegetación que mejora a las ecuaciones de la familia SAVI reduciendo el efecto del suelo con el parámetro “0.16”.

$$OSAVI = (1 + 0.16) * \frac{R_{600} - R_{670}}{R_{800} + R_{670} + 0.16}$$

– Generación de índice propio. Índice de diferencia normalizado (IDN).

Mediante los datos obtenidos con el sensor hiperespectral es posible generar un índice mediante la aplicación de análisis estadísticos de correlación entre la variable que se desea estudiar (kg de carbono secuestrado) y la reflectividad. Al determinar la relación de la variable de estudio con cada banda del espectro, es posible encontrar las regiones espectrales con mayor sensibilidad a la presencia del objeto de estudio.

Este método de creación de índice propio es utilizado por Cano et al (2013) en el que correlacionan el parámetro 'afección por clorosis férrica' y 'reflectividad' en viñedo. Para el cálculo del primer término realizan una Correlación de Pearson entre el nivel de afección y cada uno de los valores de reflectividad por banda. Seleccionan la banda con el mejor Coeficiente de Correlación (*r de Pearson*) y se calculan un índice normalizado utilizando ésta como primer término y la reflectividad de cada una de las bandas como segundo término. Los resultados de la aplicación de índice en cada banda para cada uno de los casos del universo muestral los correlacionan con la variable de verdad terreno, nivel de afección. Se selecciona la banda con mejor Coeficiente de Correlación (*r de Pearson*), que mejora la correlación anterior, como segundo término.

Esta misma metodología se ha aplicado en el presente estudio, pero la correlación en la obtención del segundo término, era más débil que en la primera correlación, por lo que se ha optado por la siguiente metodología en busca de un índice de elaboración propia.

La construcción requiere la selección de dos niveles del espectro (bandas). La primera es la banda con la longitud de onda que mejor se correlaciona con el contenido de carbono y se denomina **longitud índice** mientras que a la otra se la conoce como **longitud de referencia** la cual presenta el nivel de correlación más bajo, que permite dar cuenta de fuentes de variación distintas a la del parámetro 'contenido de carbono'.

4.3.2 Aplicación de los índices de vegetación

Para generar cada uno de los índices de vegetación (IV) se recurre a la herramienta de ENVI '*Band Math*', la cual permite aplicar los algoritmos necesarios para el cálculo entre las diversas bandas implicadas. En la tabla (1) se expone el algoritmo introducido para el cálculo de los IV.

Tabla 2. Expresiones ENVI para el cálculo de los índices de vegetación.⁵

Índice de vegetación	Expresiones ENVI
mSR	$(\text{float}(b750)-\text{float}(b445))/(\text{float}(b705)-\text{float}(b445))$
mNDVI705	$(\text{float}(b750)-\text{float}(b705))/(\text{float}(b750)+\text{float}(b705)-\text{float}(2)*(\text{float}(b445)))$
RG	$((\text{float}(b50)+\text{float}(b51)+\dots +\text{float}(b93)+\text{float}(b94))/44/((\text{float}(b24)+\text{float}(b25)+\dots +\text{float}(b48)+\text{float}(b49))/25))$
PRI	$(\text{float}(b531)-\text{float}(b570))/(\text{float}(b531)+\text{float}(b570))$
OSAVI	$[(1+0.16)*(\text{float}(b600)-\text{float}(b670))/(\text{float}(b800)+\text{float}(b670)+0.16)]$
NDVY705	$(\text{float}(b800)-\text{float}(b670))/(\text{float}(b800)+\text{float}(b670))$
MCARI	$(\text{float}(b700)-\text{float}(b670))-0.2*(\text{float}(b700)-\text{float}(b550))*(\text{float}(b700)/\text{float}(b670))$

A continuación se construye una nueva imagen multibanda con la herramienta de ENVI 'Layer Stacking'. Esta nueva imagen está formada por la unión de los 7 índices comentados, además de las 160 bandas del sensor, que posteriormente se usan para obtener el Índice de Normalización Diferencial. Por lo tanto como resultado de este proceso resulta una imagen con un total de 167 bandas que recibe el nombre de '*indices.img*'.

La información contenida en la imagen '*indices.img*' se extrae aplicando ROIs⁶. Los ROIs pertenecen a los polígonos de la capa vectorial '*datos_campo.shp*', la cual representa cada uno de los árboles medidos en campo. Los datos extraídos en estos ROIs son exportados en formato ASCII, para posteriormente ser manejados en una hoja de cálculo que recibe el nombre de '*indices.xlsx*'

⁵ Las bandas vienen definidas en estas expresiones por la longitud de onda a la que registra información la banda en cuestión, salvo el índice RG que indica el nº de la banda. Además el índice RG contiene 44 bandas en el numerador, desde las banda 50 hasta la 94 y 25 en el denominador desde la banda 24 hasta la 49, no se incluyen todas las bandas en esta expresión para facilitar la lectura de ésta. A cada banda le precede la palabra '*float*' puesto que es el tipo número con el que trabaja la herramienta '*Band Math*'.

⁶ Region of Interest: Partes de la imagen seleccionadas gráficamente o mediante otros medios, como por umbrales (ENVI User's Guide 2004).

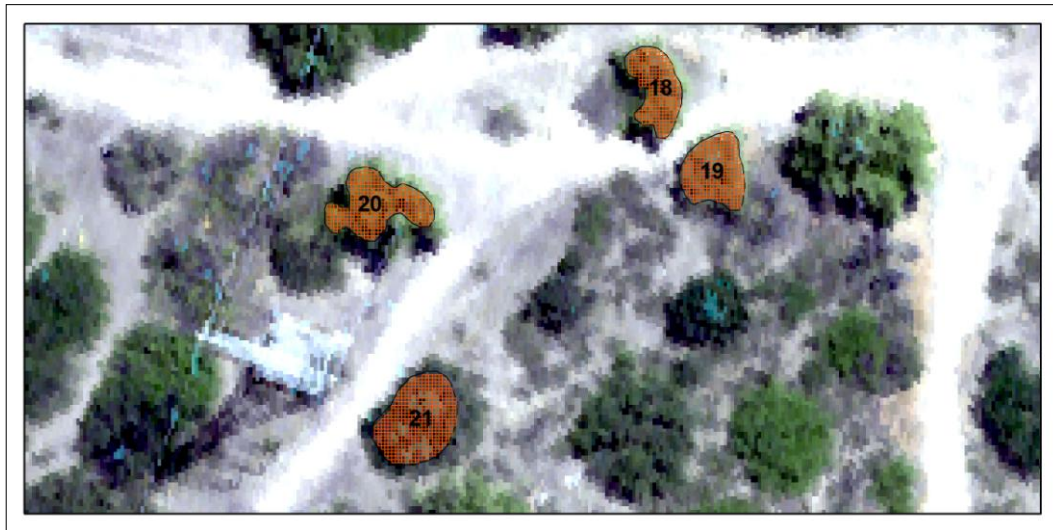


Ilustración 14. Representación gráfica del número de píxeles por cada muestra tomada en campo. En la hoja de cálculo se agrupan los valores extraídos de 'indices.img' y el carbono capturado medio por árbol. En la imagen cada árbol queda definido por

La información contenida en esta hoja de cálculo consiste en valores de cada uno de los índices de vegetación y de reflectividad de cada una de las 160 bandas asignadas para cada píxel de los datos de campo. Se debe preparar la hoja de cálculo, de manera que se obtenga para cada unidad muestral (el árbol) el valor medio de carbono capturado y el valor medio de los datos procedentes de la información contenida en '*indices.img*' de los píxeles que los componen.

De esta manera se puede proceder al análisis de comparación de correlación entre los índices de vegetación y el contenido de carbono capturado.

Para el cálculo del IDN se parte de nuevo con la hoja de cálculo '*indices.xlsx*' donde se expresan la cantidad de carbono capturado y reflectividad por longitud de onda. Para el cálculo de los términos del índice se realiza una Correlación de Pearson entre el contenido de carbono y cada uno de los valores de reflectividad por banda (Ver ilustración 15). Se selecciona la banda con el mejor Coeficiente de Correlación como '**longitud índice**' que resulta ser la banda 8; y la banda con peor correlación como '**longitud de referencia**' que resulta ser la banda 123, es decir la banda con menos sensibilidad al cambio de la variable 'carbono capturado'.

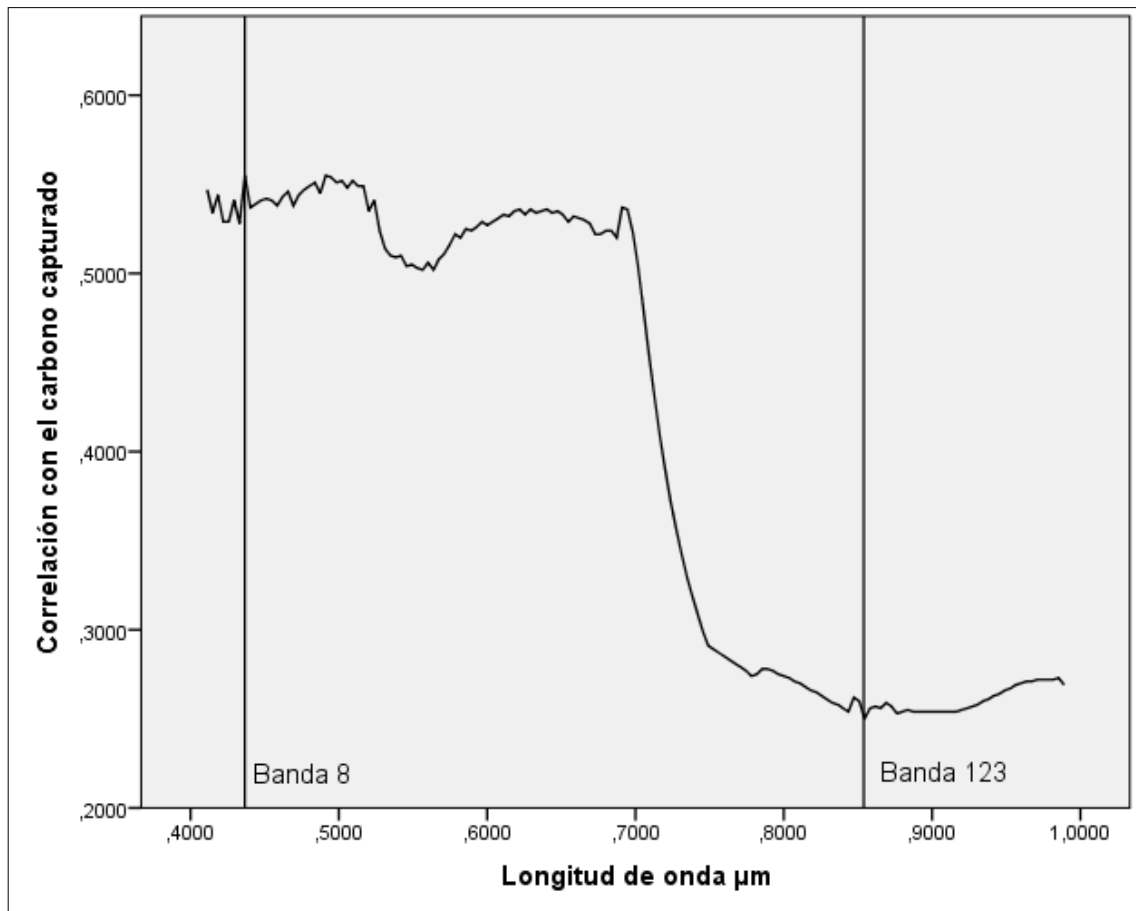


Ilustración 15. Correlación de de carbono capturado con la reflectividad espectral.

Por lo tanto el Índice Diferencial Normalizado para el cálculo de carbono capturado, queda de la siguiente manera:

$$IDN = \frac{Reflectividad\ 437nm - Reflectividad\ 855nm}{Reflectividad\ 437nm + Reflectividad\ 855nm}$$

Y su expresión en el software ENVI es:

$$(float(b437)-float(b855))/(float(b437)+float(b855))$$

5 RESULTADOS

5.1 Coeficiente de correlación de Pearson y análisis de regresión lineal.

Del proceso anterior se obtiene una hoja de cálculo, en la cual se tiene información del contenido de carbono medio por píxel en cada árbol, los 7 índices de vegetación sugeridos a través de bibliografía, además del Índice Diferencial Normalizado IDN de elaboración propia, todos ellos en valor medio por píxel.

Los datos se trabajan en el software 'IBM SPSS Statistics 20.0'. Se quiere comprobar si existe alguna asociación entre los índices y el contenido de carbono capturado mediante el análisis de correlación de Pearson y de distribución lineal.

Previamente se quiere saber si la distribución de las variables sigue una distribución normal. Para ello se realiza la prueba de Kolmogórov-Smirnov que nos indica si se cumple o no el supuesto de normalidad. El resultado se puede ver en el anexo VI, en la tabla 'Prueba de Kolmogorov-Smirnov', en la cual se demuestra que todas las variables siguen una distribución normal, puesto que en las 8 variables la significación asintótica bilateral es mayor de 0,05.

A través del coeficiente de correlación R de Pearson se comprueba si existe algún tipo de asociación entre la variable 'contenido de carbono' y cada uno de los índices calculados. La salida de SPSS muestra un cuadro resumen de las variables a correlacionar, aportando información del índice de Pearson, del número de árboles analizados y del nivel de significancia bilateral. Los resultados se pueden ver en el anexo IV, en 'cuadro de correlaciones de Pearson'.

La mayoría de índices no tienen una correlación significativa, siendo tan solo los índices PRI y RG, los que tienen una asociación moderada con valores de R superiores a 0,3.

A continuación se lleva a cabo un análisis de regresión lineal con el índice de vegetación PRI como variable independiente, puesto que es el que mayor correlación presenta con el contenido de carbono capturado. Este análisis sirve para evaluar dicha relación y estimar una recta de regresión, que permita hacer predicciones de carbono capturado. Este análisis estadístico se puede ver en el anexo VI 'Análisis de regresión lineal'.

Con estos resultados se observa que la relación entre ambas variables es moderada (coeficiente de correlación de Pearson =0.34), y el carbono capturado queda explicado en un 12% por el índice de vegetación PRI. En la siguiente figura puede verse el gráfico de la regresión lineal, cuya recta de regresión simple queda definida a partir de los coeficientes de la siguiente manera:

$$\text{Carbono capturado} = 2.478 * PRI + 1.169$$

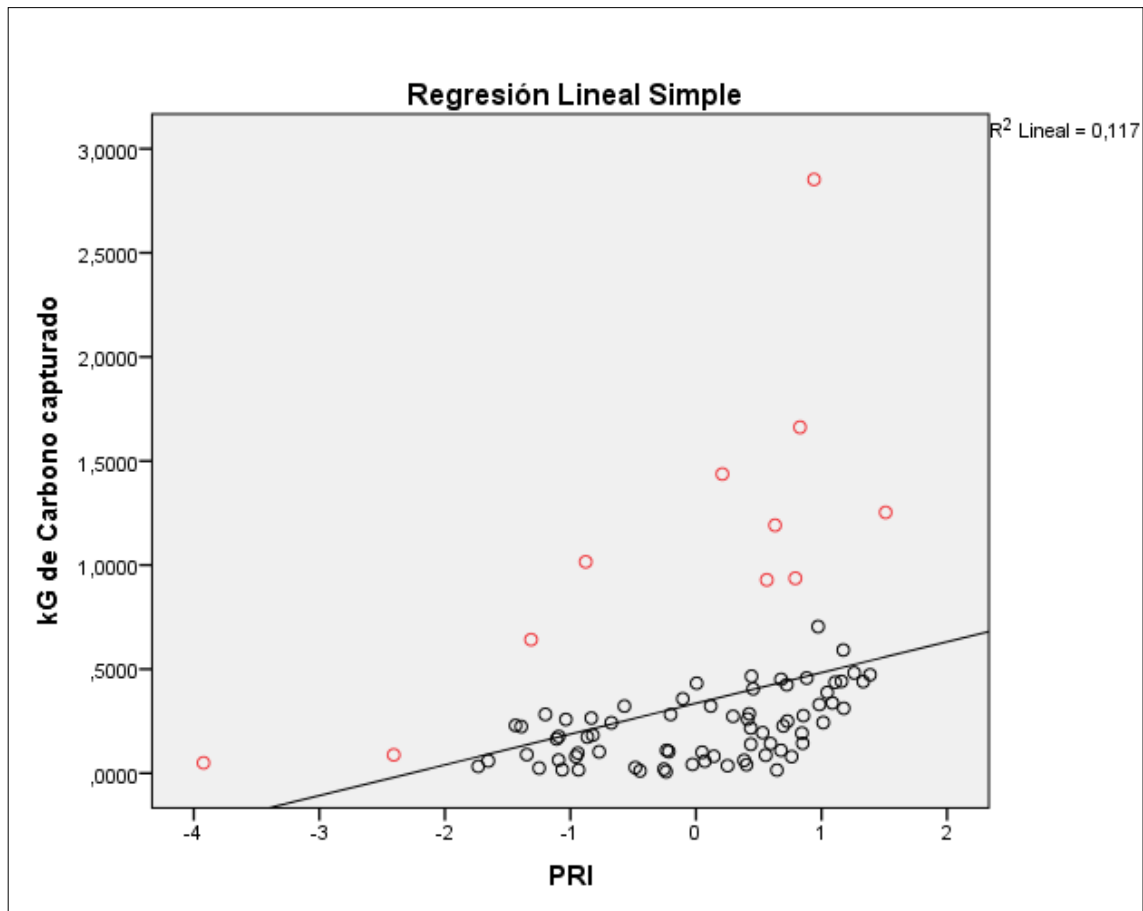


Ilustración 16. Gráfico de regresión lineal simple entre el contenido de carbono capturado y el índice de vegetación PRI.

El índice de vegetación PRI es el que mejor explica el contenido de carbono, pero la recta no se ajusta bien a la nube de puntos y el coeficiente de determinación (R^2) es muy bajo, por lo que éste no es un modelo que haga una buena predicción del carbono capturado. En el gráfico de regresión se han destacado en color rojo una serie de datos que de manera notoria debilitan la regresión.

En un análisis inicial, de manera visual se aprecia que son coberturas pertenecientes a individuos de copa muy pequeña en unos casos, y en otros se ve que hay anomalías en los píxeles (ver ilustración 16).

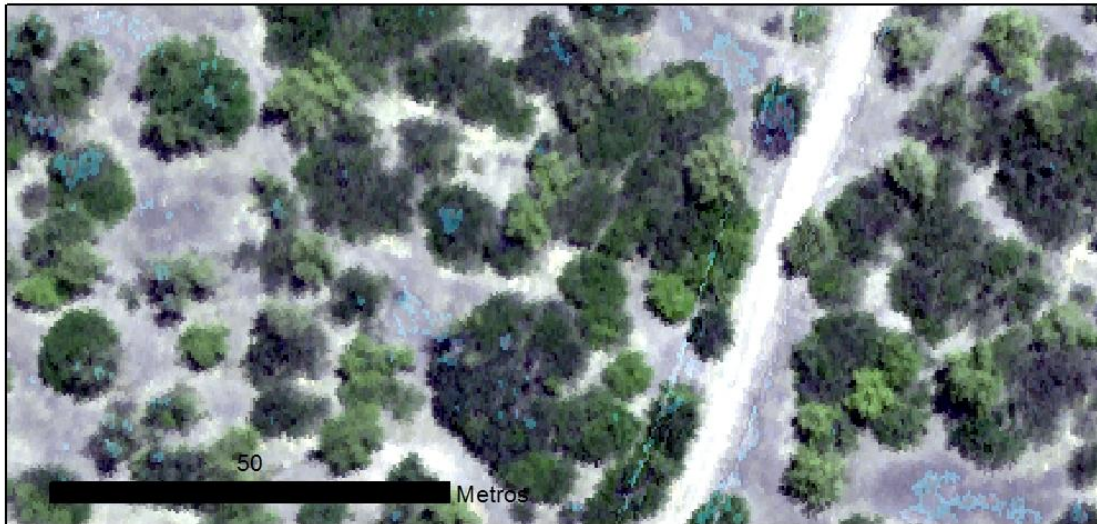


Ilustración 17. Píxeles saturados (manchas azules) sobre las copas de los árboles

Se extrae el perfil del espectro electromagnético de estos píxeles considerados anómalos y se puede observar que presentan saturación en el rango del visible.

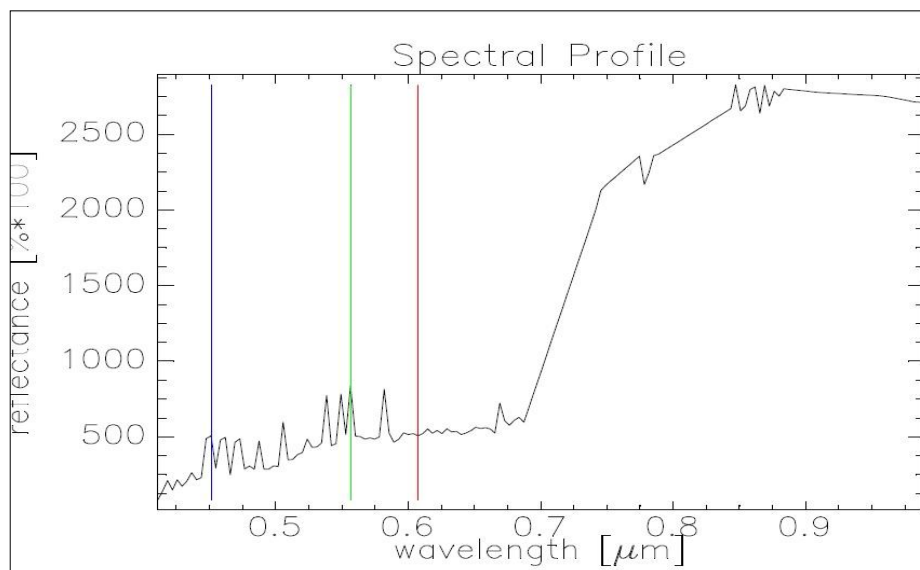


Ilustración 18. Perfil del espectro electromagnético de un píxel que presenta saturación en el visible.

Por lo que se plantea estudiar cómo se correlacionan los datos una vez eliminados los individuos que presentan anomalías en su reflectividad. De modo que se eliminan del conjunto muestral los árboles con los siguientes números de identificación: 16, 18, 21, 22, 27, 37, 38, 39, 72, 71 y 77.

El nuevo análisis de correlación de Pearson se puede ver en el anexo VI, en el cuadro 'Correlación de Pearson con datos depurados'. Se aprecia como las correlaciones entre la variable 'contenido de carbono' e 'índices de vegetación' mejora considerablemente. Nuevamente el índice PRI es el que mejor se asocia con un coeficiente de correlación de Pearson de 0.53.

El análisis de regresión con este nuevo conjunto de datos se puede consultar en el anexo VI en el cuadro 'Análisis de regresión con datos depurados'. El coeficiente de correlación de Pearson sigue siendo moderado pero considerablemente más fuerte que el anterior y lo mismo sucede con el coeficiente de determinación R^2 que en esta ocasión es de 0.28. En la siguiente figura puede verse el gráfico de la nueva regresión lineal, cuya recta de regresión simple queda definida a partir de los coeficientes de la siguiente manera:

$$\text{Carbono capturado} = 1.671 * \text{PRI} + 0.775$$

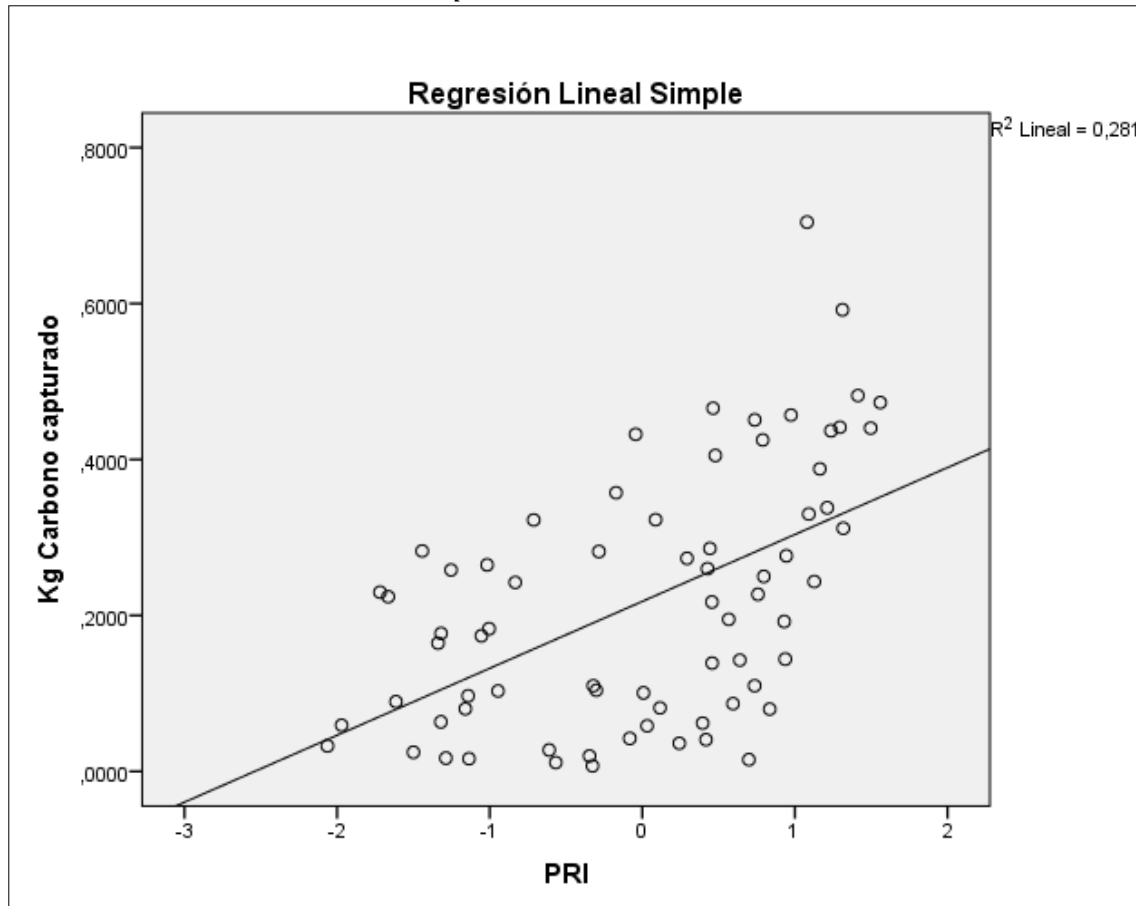


Ilustración 19. Gráfico de regresión lineal simple entre el contenido de carbono capturado y el índice de vegetación PRI, habiendo eliminado datos que debilitaban la regresión.

5.2 Análisis de variabilidad

Al haberse obtenido correlaciones tan bajas entre los índices propuestos y el contenido de carbono, se realiza un análisis de variabilidad. Este análisis se realiza con los datos de NDVI de algunas de las muestras, puesto que es un índice muy conocido y sus valores son fáciles de interpretar, con ello se pretende averiguar si existe ruido que enmascara la información de interés.

Se seleccionan aleatoriamente árboles de distinto tamaño, por ejemplo a un intervalo de 100 píxeles. Los individuos seleccionados son los que corresponden a los números de identificación: 52,70, 76, 20, 51 y 40.

En ArcMap se genera un nuevo shape con estos individuos. Este shape será la capa vectorial que se use a modo de ROI para volver a extraer los datos de NDVI en ENVI. Se extraen los ROIs en formato ASCII para realizar el análisis de variabilidad en SPSS.

En la siguiente ilustración se muestra la distribución de frecuencia de los valores de NDVI para cada individuo seleccionado.

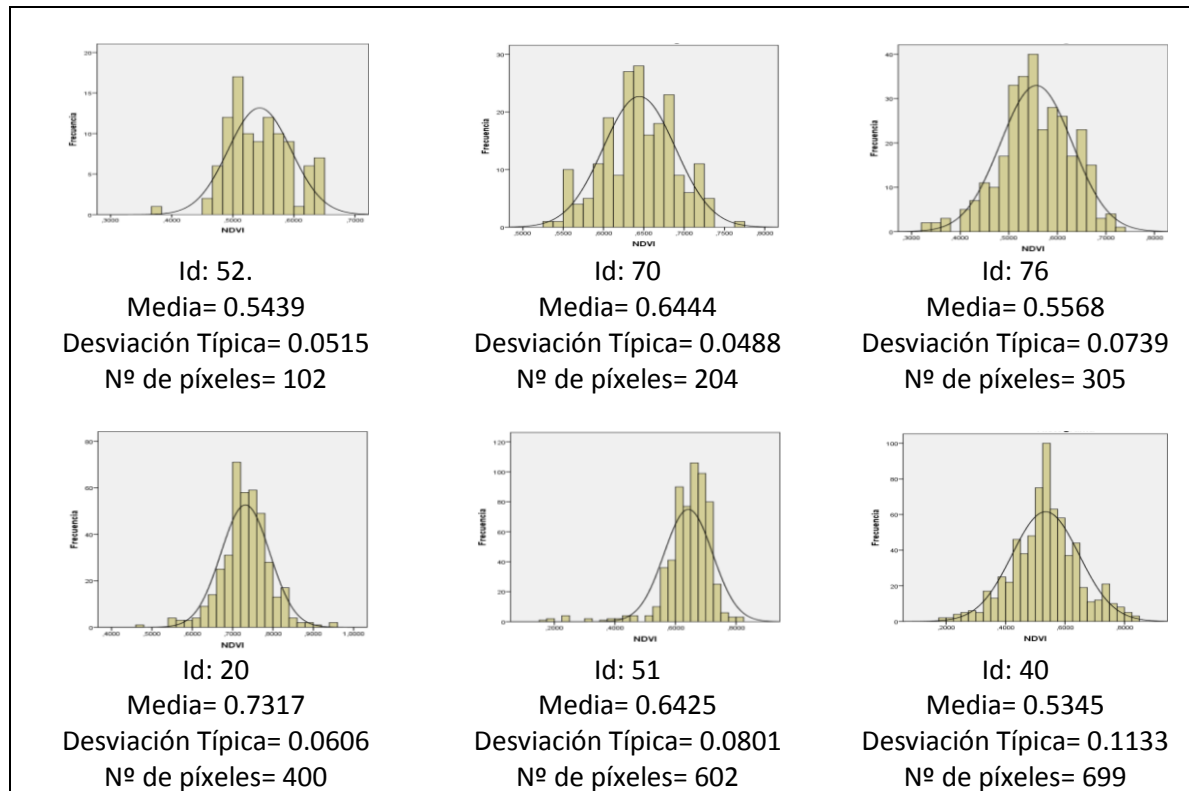


Ilustración 20. Distribución de frecuencias de NDVI en 6 muestras.

A la vista de estos resultados se puede decir que los valores de NDVI, son bajos para tratarse de píxeles que están vinculados a la copa de los árboles, habiendo abundantes valores de NDVI por debajo de 0,4. Es posible que debido a la alta resolución espacial, se estén incorporando valores de píxeles relacionados con el suelo, que enmascara el valor que debería dar la copa.

Además, la propia arquitectura de los doseles arbóreos de la mayoría de las especies consideradas origina una gran cantidad de discontinuidades que permite la observación de zonas menos irradiadas (sectores sombreados, *gap effect*) que se vinculan tanto a la perspectiva de la observación de la cubierta, como a la alta resolución espacial de la imagen hiperespectral. En este sentido, si bien las distribuciones de los individuos seleccionados se ajustan a un tipo *normal*, la existencia de numerosos píxeles con valores muy bajos (<0.4) provoca que los valores medios del individuo sean inferiores, toda vez que la media es uno de los parámetros estadísticos más influenciados por los casos extremos.

6 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES GENERALES

Los resultados obtenidos mediante correlación de los datos de índices de vegetación con los de contenido de carbono muestran un nivel de asociación entre estas variables muy bajo. El índice de vegetación PRI es el que mejor explica el contenido de carbono con un coeficiente de Pearson de 0,34, no obstante, al analizar mediante regresión lineal el índice con el contenido de carbono, resulta una ecuación con un coeficiente de determinación R^2 muy bajo, lo que lleva a descartar este índice como estimador de carbono para este tipo de formaciones vegetales. A la vista de que hay datos en el gráfico de dispersión que debilitan la correlación, se ha observado las características de los individuos que aportaban este comportamiento. Se han analizado 11 de los árboles cuyos valores más se alejan del ajuste de regresión y se observa que son individuos con copas muy pequeñas en unas ocasiones y con saturación en los píxeles en otras ocasiones.

Se ha repetido el análisis de regresión y la correlación lineal habiendo eliminado previamente los 11 individuos comentados del conjunto muestral. El coeficiente de correlación de Pearson aumenta a 0.53 y el coeficiente de determinación R^2 a 0.28. A pesar de que no son lo suficientemente fuertes para explicar la asociación de valores se advierte un aumento considerable.

A la vista de este aumento de correlación, el resultado del estudio puede mejorar si se planificara un muestreo en campo, donde se recoja información mediante muestras con un amplio rango de contenido de carbono, desde individuos con baja concentración de carbono hasta individuos con una alta concentración de éste, ya que el contenido de carbono en el muestreo del presente trabajo se mueve en un rango muy estrecho. Para abordar el problema de la saturación de píxeles se propone analizar la reflectividad de los mismos respecto de su supuesto comportamiento normal para aplicar filtros espectrales que reduzcan estas distorsiones.

El análisis de distribución de valores de NDVI en algunas de las muestras, lleva a pensar que debido a la alta resolución de la imagen hiperespectral (0,32m) se introducen datos de suelo desnudo y zonas escasamente irradiadas, añadiendo ruido y distorsionando los datos relativos a la cubierta arbórea. Es posible que la alta resolución de la imagen hiperespectral, haya contribuido a aumentar la variabilidad en los datos debido al propio carácter anisotrópico de las cubiertas vegetales.

Para caracterizar las propiedades espectro-angulares de la reflectividad, (Nicodemus et al., 1977) definen una función de proporcionalidad entre el flujo de radiación incidente y la radiancia reflejada denominada *Bidirectional Scattering-Surface Reflectance Distribution Function* (BSSRDF), cuya área observada es la denominada función de distribución de la reflectividad bidireccional o BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Esta función, determina las características geométricas de la reflectividad espectral (Camacho et al., 2002). Según Camacho et al. (2002) la BRDF depende, de las características estructurales de la cubierta, de las propiedades ópticas de sus componentes (hojas, ramas y suelo) y, del ángulo cenital solar que determinará el campo de radiación incidente. La dinámica de la BRDF viene determinada por los efectos de *gap effect* y el *backshadow effect*.

El *gap effect*, o efecto hueco, es un efecto relacionado con la perspectiva que tenemos en la observación de la cubierta (Camacho et al., 2002). En el caso del presente estudio la

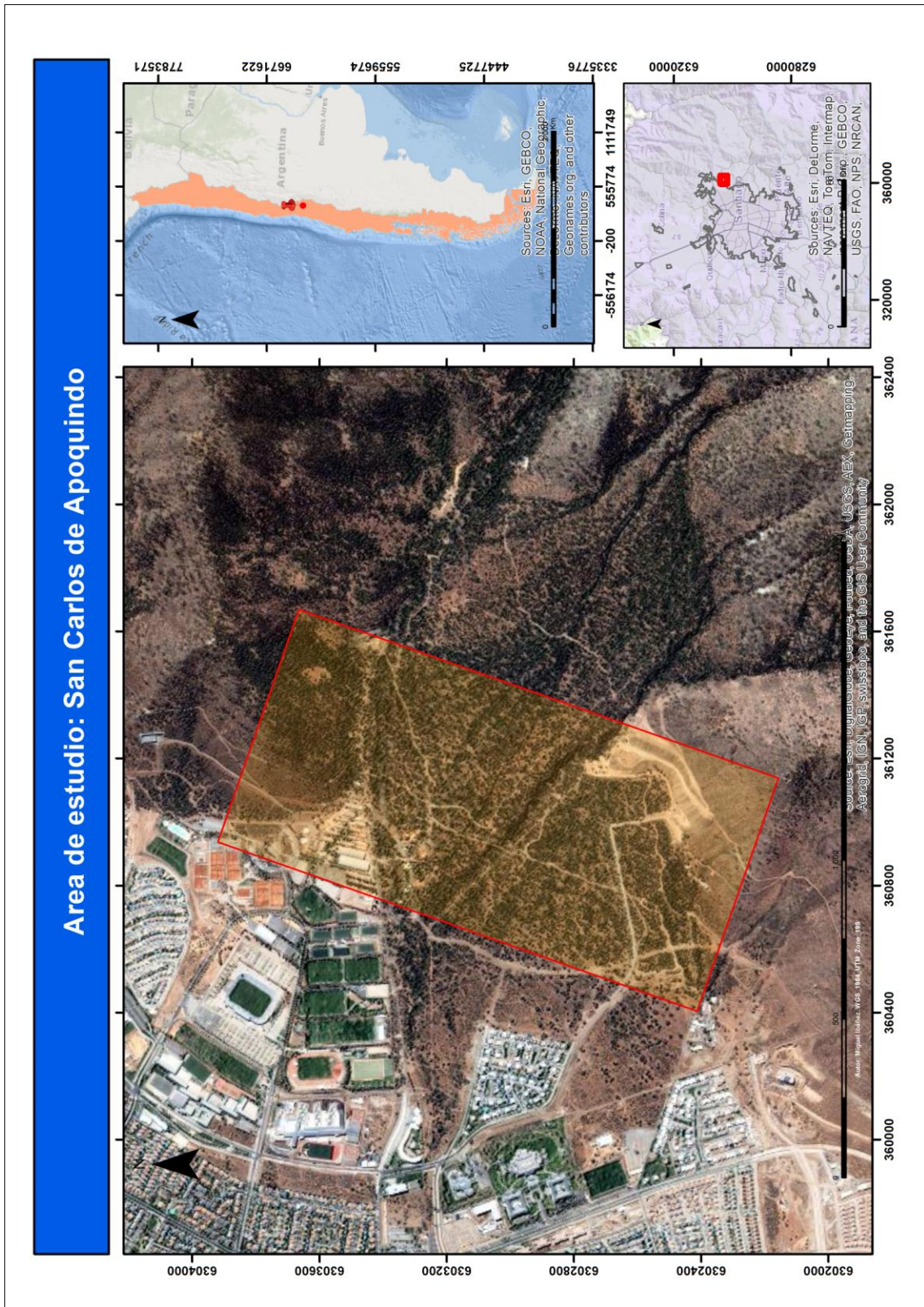
observación se realiza desde el nadir, por lo que la capacidad de penetración es mayor. Además en cubiertas abiertas con vegetación dispersa, la presencia de claros implica una mayor contribución de la respuesta espectral del suelo, condicionando así el valor de la reflectividad al intervalo espectral en que nos encontremos (Kimes 1983), aunque en el presente estudio el concepto de 'claros' debe estar relacionado con la arquitectura la copa del árbol, y los huecos que puedan quedar en su interior.

La orientación de las hojas caracterizada por la normal a la superficie de éstas, determina (junto con la posición de la fuente) el ángulo con el que son irradiadas (Camacho et al., 2002). La estructura de la copa del árbol hace que la dispersión sea diferente en unas direcciones o en otras por lo que se crean zonas oscuras o sombreadas, esto es lo que se conoce como *backshadow effect*.

Se puede pensar que la arquitectura de las especies muestreadas en este estudio favorecen estos efectos comentados, conformando cubiertas de distribución vertical o erectófilas. En el caso del litre y el quillay, dos especies siempreverdes, con la disposición de las hojas alterna, coriáceas y con un peciolo corto, o en el caso del espino, con follaje poco denso de hojas pequeñas y alargadas.

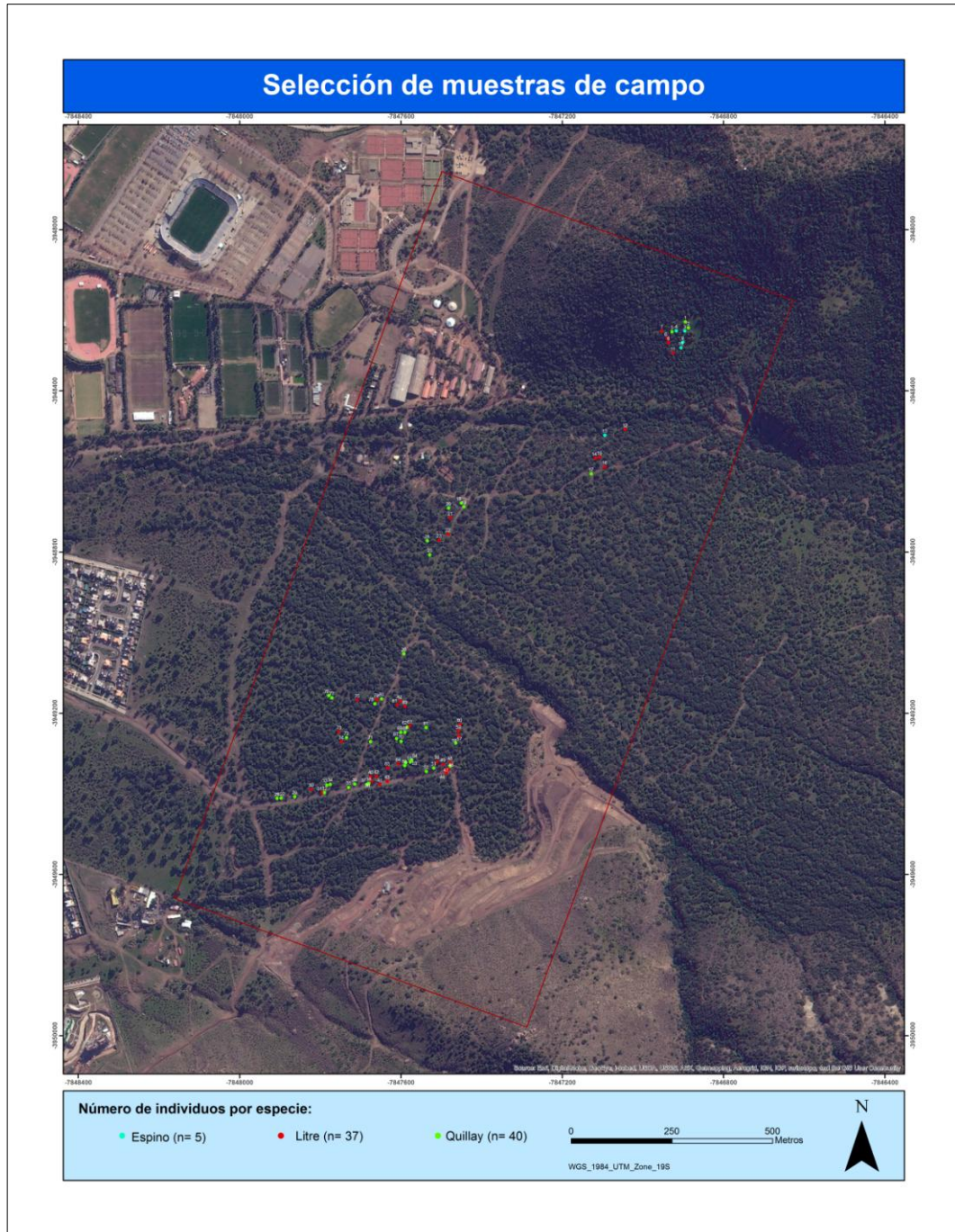
Por lo tanto si se caracterizara la anisotropía de la BRDF, se podría utilizar la variabilidad como fuente de información para el estudio de contenido de carbono capturado en este tipo de formaciones vegetales con imágenes hiperespectrales.

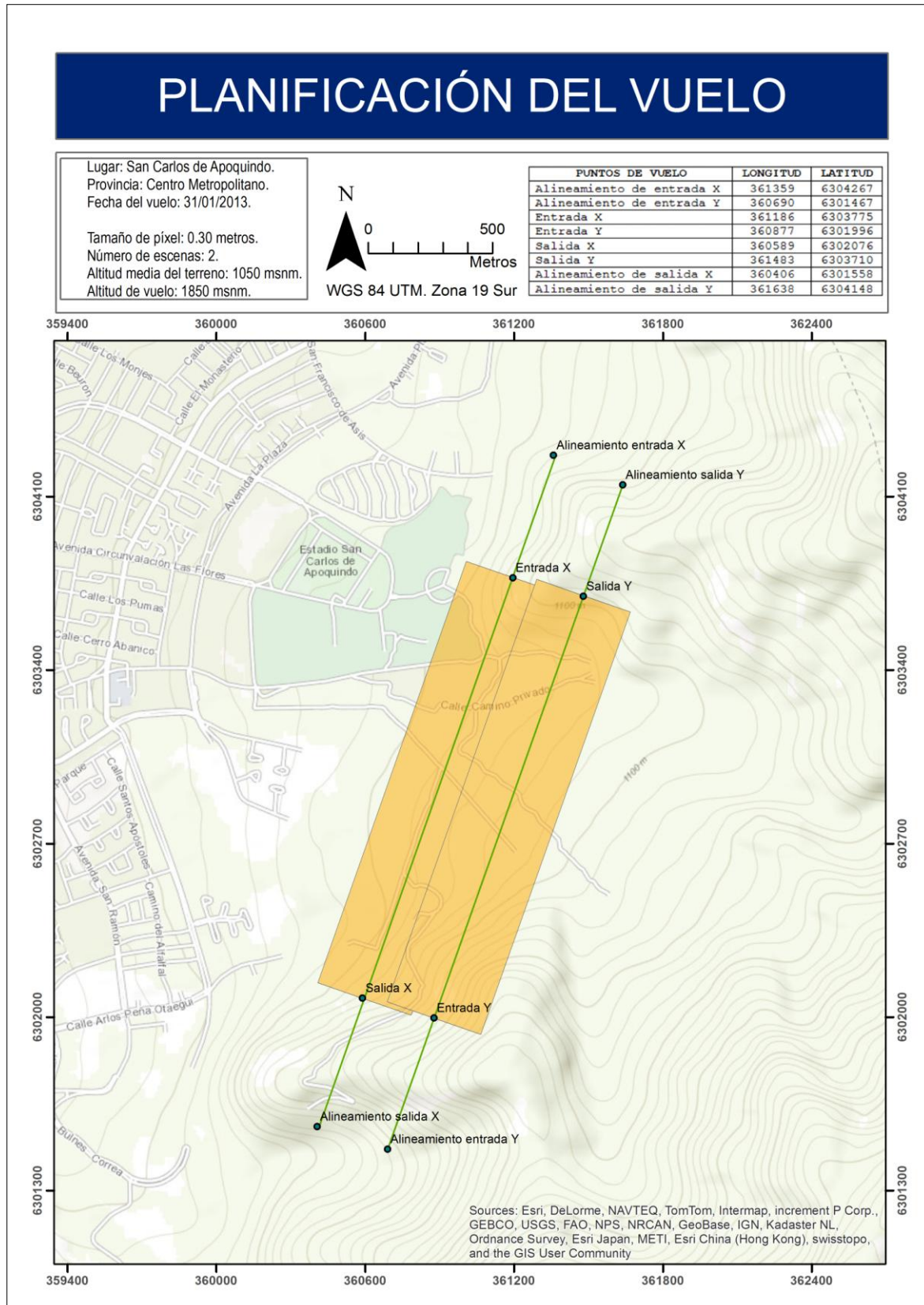
7 ANEXOS:



ID	Especie	DAC	DAM	Diametro de copa	Altura
1	Quillay	14,00	14,50	7,25	6,5
2	Quillay	23,33	24,00	9,50	9
3	Espino	6,67	5,33	4,40	2,5
4	Espino	9,33	8,33	5,90	4
5	Quillay	22,33	21,00	9,90	8
6	Litre	7,33	6,67	6,70	5
7	Litre	7,00	6,33	6,20	5
8	Litre	8,33	7,00	8,80	4
9	Espino	7,00	6,00	5,15	2,5
10	Espino	7,00	6,00	4,80	2,5
11	Litre	6,67	5,67	4,40	3,5
12	Litre	9,00	9,00	9,00	4
13	Espino	11,33	9,67	5,80	12
14	Litre	11,67	8,67	6,00	4
15	Litre	16,00	14,33	11,00	5
16	Litre	5,33	4,67	3,20	3
17	Quillay	34,67	25,33	10,50	18
18	Quillay	40,00	32,00	2,45	6
19	Quillay	16,16	15,33	3,80	6
20	Quillay	19,50	19,50	8,00	10
21	Litre	16,50	13,00	4,60	4,5
22	Litre	21,42	19,85	10,40	4,5
23	Litre	13,63	11,25	12,20	4,5
24	Quillay	15,30	14,00	12,00	7,5
25	Quillay	10,89	9,70	5,40	5
26	Quillay	18,75	16,50	8,00	4
27	Quillay	23,00	21,00	5,00	7
28	Quillay	18,33	14,33	6,70	7
29	Quillay	15,67	13,00	7,30	8
30	Litre	11,33	9,67	8,20	6
31	Litre	5,30	4,00	4,20	3
32	Quillay	7,25	6,50	4,30	4
33	Quillay	20,67	19,50	10,00	11
34	Quillay	6,00	5,83	7,60	6
35	Quillay	11,83	9,83	9,50	10
36	Quillay	27,33	24,66	11,20	12
37	Quillay	36,00	16,00	6,00	13
38	Quillay	48,00	28,00	5,00	8
39	Litre	16,00	13,67	9,00	10
40	Litre	12,33	10,67	6,00	6
41	Litre	12,00	11,00	4,00	4

ID	Especie	DAC	DAM	Diametro de copa	Altura
42	Litre	10,67	9,33	8,50	6
43	Litre	14,33	12,00	9,00	8
44	Litre	15,00	12,00	4,50	4
45	Litre	14,00	14,00	7,60	6
46	Litre	13,67	13,00	8,90	7
47	Quillay	16,67	14,33	5,50	8
48	Litre	13,67	12,00	7,70	6
49	Litre	25,67	16,67	8,40	5
50	Litre	14,33	10,33	7,00	5
51	Quillay	24,33	23,00	10,80	11
52	Quillay	11,33	10,33	5,50	8
53	Quillay	22,00	17,67	6,20	12
54	Quillay	21,67	17,67	7,40	12
55	Quillay	21,67	14,33	8,20	6
56	Quillay	21,33	16,00	8,40	10
57	Quillay	25,00	23,33	10,20	12
58	Litre	20,33	14,00	9,70	6
59	Litre	10,67	8,67	9,80	5
60	Litre	11,00	7,00	10,40	4
61	Quillay	18,67	16,00	8,50	8
62	Quillay	28,00	20,67	13,80	9
63	Litre	11,33	10,33	7,70	5
64	Litre	21,00	15,00	11,30	8
65	Litre	8,00	5,67	13,30	4
66	Quillay	30,67	23,67	9,80	10
67	Quillay	27,33	25,33	9,00	9
68	Quillay	28,67	27,33	11,00	9
69	Quillay	12,67	12,00	7,70	8
70	Quillay	28,67	27,33	11,00	9
71	Quillay	20,33	17,67	11,50	12
72	Litre	8,67	4,67	5,60	4
73	Litre	11,00	9,00	10,50	5
74	Litre	12,33	9,67	11,50	6
75	Quillay	31,33	21,33	7,00	10
76	Quillay	32,00	26,50	7,00	10
77	Quillay	23,33	20,67	6,50	10
78	Litre	11,33	8,67	10,30	5
79	Quillay	21,33	17,00	7,80	10
80	Litre	25,67	21,00	11,40	5
81	Litre	15,00	12,33	6,70	4
82	Litre	11,67	9,00	5,20	5





Plantilla de parámetros de vuelo

Parámetro	Dato	Fuente
Condición atmosférica	Sin nubosidad	Dato recopilado durante el vuelo
Fecha	30/01/2013	Dato recopilado durante el vuelo
Hora UTC	13:46:26	Dato recopilado durante el vuelo. Es la hora en del meridiano de Greenwich. En periodo estival son 3 horas más.
Altitud del vuelo	1850 mnsnm	Dato obtenido de la planificación del vuelo
Altura sobre el suelo	800 m.	Dato obtenido de la planificación del vuelo
Uso de expansor	Si	Dato obtenido de la planificación del vuelo
Píxel proyectado	0.30 m.	Dato obtenido de la planificación del vuelo
Píxel real	0.32 m	Este dato de obtiene de la estimación del ancho de escena en PARGE
Ángulo de la escena	20°	Este punto se completa una vez revisado el ángulo de la línea de vuelo en PARGE.
Ángulo de elevación solar	45.3°	Dato obtenido en ATCOR
Ángulo acimutal solar	81.5°	Dato obtenido en ATCOR
Ángulo cenital solar	44.7°	Dato obtenido en ATCOR
Modelo atmosférico	Desértico	Dato obtenido en ATCOR
Visibilidad estimada	21.0 km	Dato obtenido en ATCOR

Correlaciones de Pearson

		Carbono por píxel	DAC	DAM	Diámetro de copa	Altura	mSR	mNDVI	RG	PRI	OSAVI	NDVI	MCARI	IDN
Carbono por píxel	Correlación de Pearson	1	,649**	,535**	-,170	,359**	-,170	-,145	-,306**	,342**	,191	-,180	,234*	,237*
	Sig. (bilateral)		,000	,000	,126	,001	,126	,193	,005	,002	,085	,106	,035	,032
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
DAC	Correlación de Pearson	,649**	1	,926**	,198	,634**	-,090	-,065	-,328**	,423**	,346**	-,113	,245*	,197
	Sig. (bilateral)	,000		,000	,074	,000	,422	,563	,003	,000	,001	,310	,027	,076
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
DAM	Correlación de Pearson	,535**	,926**	1	,271*	,647**	-,071	-,049	-,323**	,425**	,369**	-,096	,207	,171
	Sig. (bilateral)	,000	,000		,014	,000	,524	,660	,003	,000	,001	,390	,062	,123
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
Diámetro de copa	Correlación de Pearson	-,170	,198	,271*	1	,318**	,169	,179	,115	-,073	,104	,163	,064	-,147
	Sig. (bilateral)	,126	,074	,014		,004	,130	,108	,303	,517	,352	,143	,569	,189
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
Altura	Correlación de Pearson	,359**	,634**	,647**	,318**	1	-,173	-,138	-,450**	,528**	,374**	-,186	,231*	,249*
	Sig. (bilateral)	,001	,000	,000	,004		,119	,215	,000	,000	,001	,094	,037	,024
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
mSR	Correlación de Pearson	-,170	-,090	-,071	,169	-,173	1	,992**	,729**	-,629**	,401**	,991**	,488**	-,945**
	Sig. (bilateral)	,126	,422	,524	,130	,119		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
mNDVI	Correlación de Pearson	-,145	-,065	-,049	,179	-,138	,992**	1	,667**	-,569**	,457**	,990**	,536**	-,943**
	Sig. (bilateral)	,193	,563	,660	,108	,215	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82

RG	Correlación de Pearson	-,306**	-,328**	-,323**	,115	-,450**	,729**	,667**	1	-,968**	-,245*	,707**	-,130	-,706**
	Sig. (bilateral)	,005	,003	,003	,303	,000	,000	,000		,000	,026	,000	,243	,000
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
PRI	Correlación de Pearson	,342**	,423**	,425**	-,073	,528**	-,629**	-,569**	-,968**	1	,414**	-,609**	,257*	,620**
	Sig. (bilateral)	,002	,000	,000	,517	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,020	,000
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
OSAVI	Correlación de Pearson	,191	,346**	,369**	,104	,374**	,401**	,457**	-,245*	,414**	1	,436**	,871**	-,381**
	Sig. (bilateral)	,085	,001	,001	,352	,001	,000	,000	,026	,000		,000	,000	,000
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
NDVI	Correlación de Pearson	-,180	-,113	-,096	,163	-,186	,991**	,990**	,707**	-,609**	,436**	1	,520**	-,973**
	Sig. (bilateral)	,106	,310	,390	,143	,094	,000	,000	,000	,000	,000		,000	,000
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
MCARI	Correlación de Pearson	,234*	,245*	,207	,064	,231*	,488**	,536**	-,130	,257*	,871**	,520**	1	-,463**
	Sig. (bilateral)	,035	,027	,062	,569	,037	,000	,000	,243	,020	,000	,000		,000
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
IDN	Correlación de Pearson	,237*	,197	,171	-,147	,249*	-,945**	-,943**	-,706**	,620**	-,381**	-,973**	-,463**	1
	Sig. (bilateral)	,032	,076	,123	,189	,024	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	
	N	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Correlación de Pearson con datos depurados

		Carbono por píxel	mSR	mNDVI	RG	PRI	OSAVI	NDVI	MCARI	IDN
Carbono por píxel	Correlación de Pearson	1	-,245*	-,219	-,469**	,530**	,273*	-,254*	,123	,305**
	Sig. (bilateral)		,039	,066	,000	,000	,021	,032	,307	,010
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71
mSR	Correlación de Pearson	-,245*	1	,994**	,656**	-,523**	,485**	,991**	,624**	-,945**
	Sig. (bilateral)	,039		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71
mNDVI	Correlación de Pearson	-,219	,994**	1	,608**	-,477**	,528**	,989**	,650**	-,939**
	Sig. (bilateral)	,066	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71
RG	Correlación de Pearson	-,469**	,656**	,608**	1	-,959**	-,257*	,650**	-,072	-,675**
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000		,000	,031	,000	,553	,000
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71
PRI	Correlación de Pearson	,530**	-,523**	-,477**	-,959**	1	,444**	-,518**	,226	,553**
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,058	,000
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71
OSAVI	Correlación de Pearson	,273*	,485**	,528**	-,257*	,444**	1	,511**	,883**	-,447**
	Sig. (bilateral)	,021	,000	,000	,031	,000		,000	,000	,000
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71
NDVI	Correlación de Pearson	-,254*	,991**	,989**	,650**	-,518**	,511**	1	,643**	-,973**
	Sig. (bilateral)	,032	,000	,000	,000	,000	,000		,000	,000
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71

MCARI	Correlación de Pearson	,123	,624**	,650**	-,072	,226	,883**	,643**	1	-,574**
	Sig. (bilateral)	,307	,000	,000	,553	,058	,000	,000		,000
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71
IDN	Correlación de Pearson	,305**	-,945**	-,939**	-,675**	,553**	-,447**	-,973**	-,574**	1
	Sig. (bilateral)	,010	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71

*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

**.. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

		PRI	mSR	mNDVI	RG	OSAVI	NDVI	MCARI	IDN
N		82	82	82	82	82	82	82	82
Parámetros normales ^{a,b}	Media	-,336091	2,283546	,384733	1,796153	,001822	,612972	257,552231	-,842917
	Desviación típica	,0596308	,2293264	,0441704	,2295447	,0234451	,0888210	76,8476944	,0404534
	Absoluta	,137	,054	,069	,138	,072	,053	,062	,064
Diferencias más extremas	Positiva	,071	,052	,056	,138	,047	,053	,061	,064
	Negativa	-,137	-,054	-,069	-,105	-,072	-,044	-,062	-,049
Z de Kolmogorov-Smirnov		1,242	,492	,625	1,248	,648	,476	,561	,578
Sig. asintót. (bilateral)		,092	,969	,830	,089	,796	,977	,911	,892

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Análisis de regresión lineal

Estadísticos descriptivos				Correlaciones				
	Media	Desviación típica	N			Carbono por píxel	PRI	
Carbono por píxel	,335818	,4318756	82	Correlación de Pearson	Carbono por píxel	1,000	,342	
PRI	-,336091	,0596308	82	Sig. (unilateral)	PRI	,342	1,000	
					Carbono por píxel	.	,001	
					PRI	,001	.	
				N	Carbono por píxel	82	82	
					PRI	82	82	

Resumen del modelo ^b									
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	,342 ^a	,117	,106	,4083434	,117	10,605	1	80	,002

a. Variables predictoras: (Constante), PRI
 b. Variable dependiente: Carbono por píxel

ANOVA^a

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	1,768	1	1,768	10,605	,002 ^b
Residual	13,340	80	,167		
Total	15,108	81			

a. Variable dependiente: Carbono por píxel

b. Variables predictoras: (Constante), PRI

Coefficientes^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	1,169	,260		4,500	,000
PRI	2,478	,761	,342	3,257	,002

a. Variable dependiente: Carbono por píxel

Estadísticos sobre los residuos^a

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	-,243816	,558994	,335818	,1477524	82
Residual	-,4159766	2,3772898	0E-7	,4058150	82
Valor pronosticado tip.	-3,923	1,510	,000	1,000	82
Residuo típ.	-1,019	5,822	,000	,994	82

a. Variable dependiente: Carbono por píxel

Análisis de regresión lineal con datos depurados

Estadísticos descriptivos				Correlaciones					
	Media	Desviación típica	N			Carbono por píxel	PRI		
Carbono por píxel	,218033	,1618754	71	Correlación de Pearson	Carbono por píxel	1,000	,530		
PRI	-,333533	,0513696	71		PRI	,530	1,000		
				Sig. (unilateral)	Carbono por píxel	.	,000		
					PRI	,000	.		
				N	Carbono por píxel	71	71		
					PRI	71	71		

Resumen del modelo ^b									
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	,530 ^a	,281	,271	,1382433	,281	26,978	1	69	,000

a. Variables predictoras: (Constante), PRI
 b. Variable dependiente: Carbono por píxel

Resumen del modelob

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	,530a	,281	,271	,1382433	,281	26,978	1	69	,000

a. Variables predictoras: (Constante), PRI
 b. Variable dependiente: Carbono por píxel

Coefficientesa

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Correlaciones		
	B	Error típ.	Beta			Orden cero	Parcial	Semiparcial
1	(Constante)	,775	,109					
	PRI	1,671	,322	,530	7,143	,000	,530	,530

a. Variable dependiente: Carbono por píxel

Estadísticos sobre los residuosa

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	,040952	,351887	,218033	,0858222	71
Residual	-,2628916	,3937906	0E-7	,1372523	71
Valor pronosticado tip.	-2,063	1,560	,000	1,000	71
Residuo típ.	-1,902	2,849	,000	,993	71

a. Variable dependiente: Carbono por píxel

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baret, F., y G. Guyot. «Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment.» *Remote Sensing of Environment*, n° 35 (1991): 61-173.
- Camacho de Coca, F. J. García-Haro, M. A. Gilabert y J. Meliá. «La anisotropía de la BRDF: Una nueva signatura de las cubiertas vegetales.» *Revista de Teledetección*, n° 18 (2002): 29-46.
- Cano, J. Herrera, P. Vidal. *Sectorización de Viña Tabolí por Nivel de afectación de Clorosis Férrica*. Santiago de Chile.: Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Silvoagropecuarias, Universidad Mayor., 2013.
- Chile, Biblioteca del Congreso Nacional de. <http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region13/clima.htm>. (último acceso: 19 de Octubre de 2013).
- Cruz, P. Honeyman, P., Hube, C., Urrutia, J., Ravanal, C., Venegas, A., & C, S. *Modelo de Gestión Forestal para el uso sustentable de los Bosques Mediterráneos Chilenos*. Santiago. Santiago de Chile: Univesidad Mayor, 2008.
- ENVI User's Guide*. ENVI Version 4.1. September 2004 Edition. RSI. Research Systems Inc. , 2004.
- Flores, d. & Díaz, M. «Conservación del Bosque Esclerófilo en el Paisaje Natural y Cultural de Chile central.» *Actas del primer Coloquio sobre la Herencia Natural de Chile*. Santiago de Chile: Universidad Mayor, 2007.
- Gamon, J.A., J. Penuelas, and C.B. Field. «A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency.» *Remote Sensing of Environment*, n° 41 (1992): 35-44.
- Gamon, J.A., L. Serrano, and J.S. Surfus,. «The Photochemical Reflectance Index: An Optical Indicator of Photosynthetic Radiation Use Efficiency Across Species, Functional Types and Nutrient Levels.» *Oecologia* , n° 112 (1997): 492-501.
- Gorte, W, y 7-7266 Specialist in Natural Resources Policy. rgorte@crs.loc.gov. «Carbon Sequestration in Forests.» Congressional Research Service, 2009.
- Haboudane, D., Tremblay, N., Miller, J.R., Vigneault, P. «Remote Estimation of Crop Chlorophyll Content Using Spectral Indices Derived From Hyperspectral Data.» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, n° 46 (2008): 423-437.
- Kalácska, M., Sánchez- Azofoira, A., Rivard, B., Caelli, T., White, HP., y Calvo Alvarado, J.C. «Ecological fingerprinting of ecosystem succession Estimating secondary tropical dry forest and diversitu using imaging spectroscopy.» *Remote Sensing of Environmental*, n° 108 (2007): 82-96.
- Kimes, D. S. «Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies.» *Applied Optics*, n° 22 (1983): 1364-1372.
- Martín, Alberto García. *Estimación de la biomasa residual mediante imágenes de satélite y trabajo de campo. Modelización del potencial energético de los bosques turolentes*. Tesis Doctoral, 2009.
- Nicodemus, F. E., RICHMOND, J. C. HSIA, J. J., GINSBERG, I. W. and LIMPERIS, F. *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. National Bureau of Standards. NBS. Monograph 160., 1977.
- Ramírez, F. «Un aporte sobre la historia ecológica del deterioro de los bosques de Chile central.» *Actas del primer Coloquio sobre la Herencia Natural de Chile, “La Conservación del Bosque Esclerófilo en el Paisaje Natural y Cultural de Chile central”*. Universidad de Chile., 2007.

Sims, D.A. and J.A. Gamon,. «Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages.» *Remote Sensing of Environment*, n° 81 (2002): 337-354.

Singh, Sandipan Das and T.P. «Correlation analysis between biomass and spectral vegetation indices of forest ecosystem.» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 1, n° 5 (2012): ISSN: 2278-0181.

Teledet. <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-hiperespectrales.htm>. 2013. (último acceso: 1 de Octubre de 2013).

Thomas J. Bruno, Paris D. N. Svoronos. *CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts*. Taylor and Francis Group, 2005.

Tickle, P., Coops, N., Hafner, S., & Team, T. «Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL.» *Forest Ecology Manage*, n° 152 (2001): 272-291.

UACH. «<http://www.uach.cl/programa/carbono.html>.» *Universidad Austral de Chile*. 2013.