

Generación de indicadores de la vegetación de matorral seco en Alamala (Loja) a partir de imágenes multiespectrales de alta resolución

Jesús Jiménez López

2018-03-07

Índice general

Resumen	1
1 Introducción	1
1.1 Índices de vegetación	2
2 Materiales y Métodos	3
2.1 Área de estudio	3
2.2 Materiales empleados y operaciones de vuelo	4
2.3 Procesamiento de datos	5
3 Resultados de los índices de vegetación	6
4 Discusión y conclusiones	6
4.1 Índices de vegetación	6
4.2 Limitaciones del sensor y consideraciones de vuelo	6
4.3 Calibración geométrica	8
4.4 Calibración radiométrica	8
Agradecimientos	8
5 Anexo	8
5.1 Estadísticos	8
5.2 Ortomosaicos	9
5.3 Índices de vegetación	12

Resumen

Este informe describe el procedimiento empleado para la captura de imágenes aéreas, procesamiento y cálculo de índices de vegetación a partir de una cámara multiespectral Tetracam ADC micro instalada en un vehículo aéreo no tripulado (RPAS, UAV). Para los vuelos en los que no se pudieron obtener los productos fotogramétricos completos, se seleccionaron las imágenes de mayor calidad que cubrieran las parcelas de interés. Los resultados obtenidos demuestran que es posible generar información multiespectral de alta resolución en áreas naturales. Sin embargo, es preciso refinar la metodología con objeto de aumentar la fiabilidad de los indicadores.

1 Introducción

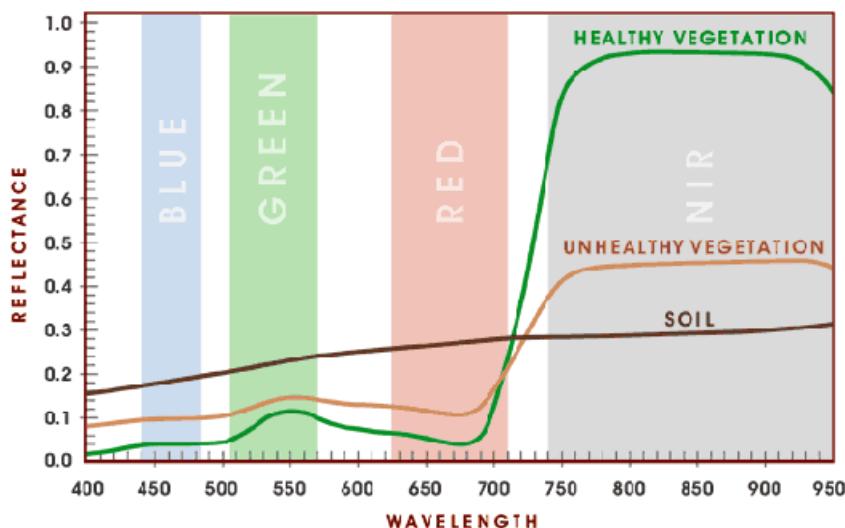
En el campo de la teledetección ambiental se han desarrollado numerosos cocientes e índices de vegetación relacionados con el vigor y la salud de las plantas (Bannari et al., 1995). Estos indicadores, en conjunto con

otras métricas espectrales, han demostrado ser de gran utilidad para una amplia variedad de estudios de ecología y conservación (Wang et al., 2010). Desafortunadamente, las restricciones financieras y tecnológicas para la captura de imágenes obtenidas por medio de sensores a bordo de plataformas aéreas o espaciales han limitado la efectividad de la teledetección en la recolección de datos de la superficie terrestre a escalas de detalle. Como consecuencia, los RPAS se han posicionado como un complemento adecuado para estudios ambientales en áreas de pequeña extensión, permitiendo obtener imágenes a una elevada resolución espacial y temporal a un menor costo (Koh and Wich, 2012). Este impulso ha sido especialmente notable con el desarrollo paralelo de sensores multiespectrales adaptados a aeronaves de pequeño tamaño, en conjunto con la aparición de programas informáticos que facilitan el procesamiento fotogramétrico y el análisis de grandes volúmenes de datos.

El presente estudio investiga el uso de RPAS para estudios de vegetación a partir del análisis de imágenes multiespectrales adquiridas durante una campaña de vuelos en la provincia de Loja (Ecuador). Tras comentar brevemente los índices de vegetación empleados, se describe la metodología de campo y el procesamiento posterior de las imágenes. Finalmente se realiza un análisis pormenorizado de los resultados obtenidos y se proponen algunas recomendaciones de cara a futuras campañas de vuelo.

1.1 Índices de vegetación

Los índices de vegetación (IV) son un conjunto de combinaciones algebraicas realizadas a partir de los niveles digitales de distintas bandas del espectro electromagnético. Han sido diseñados con objeto de discriminar cubiertas y realzar ciertas propiedades de la vegetación relacionadas con su composición, estructura y estado fisiológico. Estos IV se fundamentan en el particular comportamiento radiométrico de las plantas, dando lugar a una curva espectral típica de la vegetación saludable [ver imagen ??]. Los pigmentos fotosintéticos absorben la mayor parte de la radiación en el visible, dentro del rango de la denominada radiación fotosintéticamente activa (400 -750 μm) o PAR. Por el contrario, las hojas reflejan un gran porcentaje de la radiación correspondiente al infrarrojo cercano (075-1.3 μm), también denominado IRC. A medida que la vegetación enferma la actividad fotosintética disminuye, de la misma forma que el contraste entre ambas bandas del espectro. La caracterización de estas variaciones de contraste constituye el fundamento de la mayoría de los IV.



Por regla general los IV se calculan a partir de superficies de reflectancia, obtenidas previa calibración radiométrica de las imágenes y teniendo en cuenta principalmente las condiciones de iluminación en el momento de la toma, junto con otros factores dependientes de la óptica del sensor. Si bien es posible calcular los IV directamente a partir de los valores “brutos” de las imágenes, no es posible conceder un valor físico

a los resultados (Chuvieco Salinero, 2006), por lo que no son aptos para estudios cuantitativos de carácter multitemporal o en los que se pretenda comparar los resultados obtenidos por diferentes sensores.

En este trabajo se calcularon tres índices de vegetación (ver tabla 1): índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice modificado de vegetación ajustada al suelo (MSAVI2) e índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI).

Cuadro 1: Índices de vegetación

IV	Descripción	Fuente	Bandas	Fórmula
NDVI	Normalised Difference Vegetation Index	Rouse et al., 1973	red, nir	$(\text{nir} - \text{red}) / (\text{nir} + \text{red})$
GNDVI	Green Normalised Difference Vegetation Index	Gitelson 1998	red, nir	$(\text{nir} - \text{green}) / (\text{nir} + \text{green})$
MSAVI2	Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2	Qi et al., 1994	red, nir	$(2 * (\text{nir} + 1) - \sqrt{(2 * \text{nir} + 1)^2 - 8 * (\text{nir} - \text{red})}) / 2$

1.1.1 NDVI

El índice más conocido y más ampliamente utilizado para el monitoreo de la vegetación es el NDVI (Rouse et al., 1973), a partir del cual han surgido numerosas variantes. A menudo se relaciona directamente con otros parámetros de la superficie terrestre, incluyendo el porcentaje de cobertura del suelo, la actividad fotosintética de la planta, el contenido de agua, el índice del área foliar y la biomasa (Pettorelli, 2013). En otros casos ha sido empleado en estudios que tratan de predecir patrones de biodiversidad a diferentes escalas espaciales (Madonsela et al., 2018; Gillespie, 2011; Levin et al., 2007).

1.1.2 MSAVI2

El MSAVI2 (Qi et al., 1994) aborda algunas de las limitaciones del NDVI cuando se aplican en áreas de vegetación dispersa, con una alta superficie de suelo desnudo. A diferencia del índice de vegetación ajustado al suelo original (SAVI), no necesita especificar empíricamente el factor de corrección del brillo del suelo (L) según el grado de cobertura vegetal en el área de estudio.

1.1.3 GNDVI

El GNDVI (Gitelson and Merzlyak, 1998) es una versión modificada del NDVI, sustituyendo la banda del rojo por la del verde. Debido a su mayor sensibilidad a variaciones en la concentración de clorofila, ha sido ampliamente utilizado en agricultura de precisión para caracterizar el grado de madurez de los cultivos.

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio (ver imagen 1) está situada en el sector de Alamala, cantón de Catamayo (Loja, provincia de Ecuador). El clima es de tipo subtropical seco, con una temperatura media anual de 27 °C y precipitaciones de 388 mm/año. La época seca se extiende desde el mes de mayo a enero, mientras que la temporada de lluvias abarca los meses restantes (Sierra et al., 1999). A diferencia de otras regiones, las temperaturas más altas se registran a bajas altitudes, suavizándose conforme se avanza a cotas más altas donde suele haber una mayor disponibilidad de agua (Espinosa et al., 2014). El paisaje está dominado por comunidades dispersas de matorral arbustivo sobre una matriz de suelo desnudo, fundamentalmente por una especie del género *Croton*, perteneciente a la familia de las euforbiáceas (*Croton wagneri Mull*). En esta área se ubican las parcelas de vegetación siguiendo un gradiente altitudinal desde los 1700 a los 1400 metros aproximadamente (según

estación total). La mitad de las parcelas consideradas están protegidas frente a la herbivoría por medio de cercos.

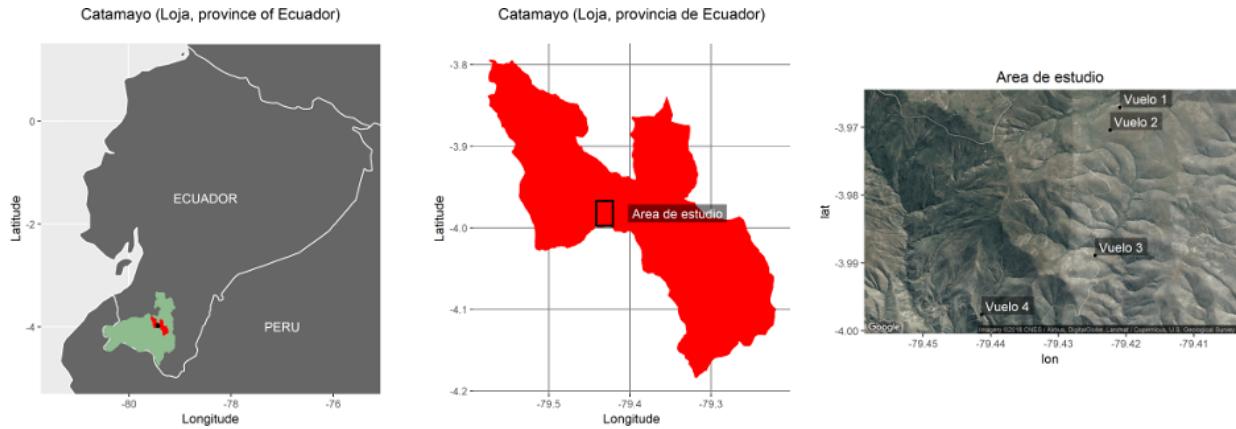


Figura 1: Área de estudio

2.2 Materiales empleados y operaciones de vuelo

Para la toma de imágenes se utilizó un RPAS multirrotor de tipo tetracóptero (3DR Solo), con una autonomía aproximada de 15 minutos. En la parte inferior del RPAS se adaptó una cámara multispectral Tetracam ADC micro apuntando al nadir y conectada a un módulo de GPS (ver imagen 2) . Esta cámara permite obtener fotografías en falso color (Verde, Rojo e IRC) en el rango de los 520 a 920 nanómetros, equivalentes a Landsat TM2, TM3 y TM4. El sensor es de tipo CMOS, con una resolución de 3.2 Megapixeles (2048 x 1536 pixeles) y presenta un mecanismo de captura de tipo “rolling shutter”. Los parámetros ópticos están fijos a una distancia focal de 8,43 mm y una apertura óptica de f/3,2.



Figura 2: Cámara multispectral Tetracam ADC Micro y plataforma de vuelo 3dr Solo

Cada uno de los vuelos fue diseñado con el software Mission Planner (imagen 3), cubriendo las parcelas anteriormente mencionadas y en franjas horarias comprendidas entre las 11 a.m. y las 14 a.m. horas del 13 de Diciembre de 2017 (ver tabla 2). El grado de nubosidad durante este periodo pasó de cielo prácticamente despejado a cielo parcialmente cubierto.

El RPAS fue configurado para volar a una velocidad aproximada de 4 m/s y a una altura media sobre el

Cuadro 2: Localización de los vuelos (UTM 17S)

vuelo	este	norte	elev
1	675316.5	9561342	1725
2	675157.2	9560972	1727
3	674904.7	9558930	1580
4	673041.8	9557971	1402

terreno de 100 metros siguiendo las misiones previamente definidas. El periodo efectivo de vuelo se mantuvo por debajo de los 10 minutos en todos los casos. La cámara fue programada para la toma de imágenes cada 2 segundos aproximadamente y configurada en ajuste automático de la velocidad de obturación, con objeto de compensar las variaciones de iluminación en el terreno. Previamente a cada vuelo se tomó una fotografía a un panel de calibración (teflón, reflectancia promedio del 99%) con objeto de calibrar radiométricamente las imágenes.

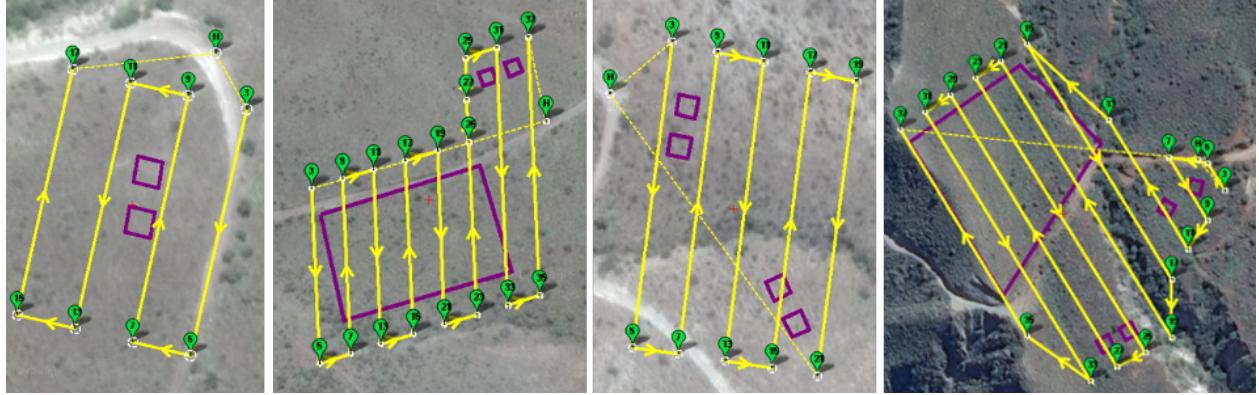


Figura 3: Diseño de vuelos 1, 2, 3 y 4 en Mission Planner

2.3 Procesamiento de datos

Las imágenes fueron procesadas mediante el software PixelWrench2 (PW2) de Tetracam para producir composiciones en falso color mediante interpolación cromática de los píxeles para cada una de las bandas registradas. Inicialmente se obtuvo un archivo de coordenadas geográficas a partir del registro generado por la cámara durante el vuelo. Posteriormente se tomó una muestra del panel de calibración a partir de las imágenes tomadas para cada uno de los vuelos. El archivo de calibración generado fue utilizado para procesar las imágenes en formato RAW, que fueron convertidas a TIFF y geoetiquetadas mediante la programación de un script en Python (Jiménez, 2018) que hace uso del archivo de coordenadas generados por PW2. Posteriormente se descartaron las imágenes que no formaban parte del plan de vuelo o consideradas de baja calidad, según una identificación visual previa. Para generar los mosaicos se probaron diferentes programas basados en la estructura a partir del movimiento (SfM), incluyendo VisualSfM y versiones de prueba de Pix4D y Agisoft Photoscan, siendo este último el elegido para el procesamiento fotogramétrico. La mala calidad de las imágenes junto con la ausencia de puntos de control en el terreno impidió el cálculo de los parámetros de alineación/orientación de las escenas a partir de los cuales se construye la nube dispersa de puntos, por lo que se optó por seleccionar las imágenes individuales de mayor calidad que cubrieran las parcelas de interés. Únicamente para el vuelo 3 se pudieron obtener los productos fotogramétricos completos, incluyendo ortofoto y modelo digital de elevaciones (DEM).

Las escenas fueron posteriormente georreferenciadas y escaladas en QGIS (QGIS, 2017) tomando como re-

ferencia aquellas parcelas en las que se había instalado un cerco visible a su alrededor. Para la corrección geométrica de las imágenes se utilizó una transformación polinómica de primer orden, seguida de una interpolación por convolución cúbica, recomendada para fotografías aéreas e imágenes de satélite. A partir de las ortofotos se extrajeron las parcelas de interés, se calcularon los índices espectrales de vegetación mediante la librería RStoolbox (R Core Team, 2017; Leutner and Horning, 2017) y se procedió al análisis exploratorio de los valores obtenidos. La resolución final promedio fue de 4.5 cm/pixel, suficiente para estudios de vegetación a escala local.

3 Resultados de los índices de vegetación

Debido al gran volumen de datos obtenidos, los resultados se muestran en el Anexo adjunto. Junto con los mapas de IV, se presentan los estadísticos más relevantes según diferentes combinaciones de factores, incluyendo índices por parcela, gradiente altitudinal (zonas de vuelo) e índices totales (media, mediana, desviación típica, máximos y mínimos). Los valores obtenidos se mantienen dentro de los límites esperados para todos los índices (-1 a 1). Valores bajos o negativos corresponden a zonas de escasa o nula actividad fotosintética, representados en tonos amarillos a rojos. Las zonas con presencia de vegetación aparecen en verde. El GNDVI muestra un comportamiento distintivo aunque coherente respecto al NDVI y MSAVI2, probablemente por la sustitución de la banda del rojo por la del verde.

4 Discusión y conclusiones

4.1 Índices de vegetación

En términos generales los IV muestran valores promedios relativamente similares y considerablemente bajos. La baja productividad primaria puede ser debida a la prolongada ausencia de lluvias previa a la captura de las imágenes, dando lugar a un comportamiento más homogéneo de las comunidades vegetales independientemente de su ubicación. Sería interesante comparar los resultados frente a condiciones climáticas más benignas, caracterizadas por períodos de relativa abundancia de agua y probablemente menor insolación. La desviación típica refleja la variabilidad espacial en la productividad de los ecosistemas y no parece verse afectada en exceso por valores extremos. La presencia de picos máximos en los IV suele estar relacionada con áreas de vegetación donde la actividad fotosintética es más acusada, si bien la baja densidad de valores particularmente altos podría reflejar una deficiente calibración del sensor. Un análisis estadístico apropiado de los datos obtenidos permitiría evaluar posibles cambios en la cobertura vegetal y actividad fotosintética de las plantas en función del gradiente altitudinal y la presencia / ausencia de herbivoría. Estas diferencias podrían ser más marcadas en temporada de lluvias. Para analizar estas diferencias y obtener resultados más concluyentes convendría ampliar el rango temporal del estudio.

4.2 Limitaciones del sensor y consideraciones de vuelo

La cámara multiespectral Tetracam ADC micro tiene algunas limitaciones técnicas importantes que conviene aclarar. El sensor de banda ancha está diseñado a partir de una matriz simple de fotodiodos, denominada matriz de Bayer, sensibles a cambios en la intensidad lumínica. Estos fotodiodos no son capaces de discriminar el color, por lo que generalmente se procede a una interpolación de los valores obtenidos según la disposición de un conjunto de filtros selectivos que en principio solo dejan pasar la radiación para cada uno de los tres canales disponibles. Esta configuración es habitual en la mayoría de cámaras de consumo, pero generalmente adolecen de un mayor solape espectral entre bandas. La mezcla de la señal para diferentes longitudes de onda dificulta en gran medida la discriminación de la respuesta espectral de la vegetación y la comparación con otros sensores de alta gama. Por otra parte, la cámara utiliza un mecanismo de captura de tipo “rolling shutter”, por el cual la imagen se registra siguiendo un proceso secuencial de escaneado en sentido vertical u horizontal. Este sistema suele ser propenso a una serie de distorsiones en la imagen cuando la fotografía

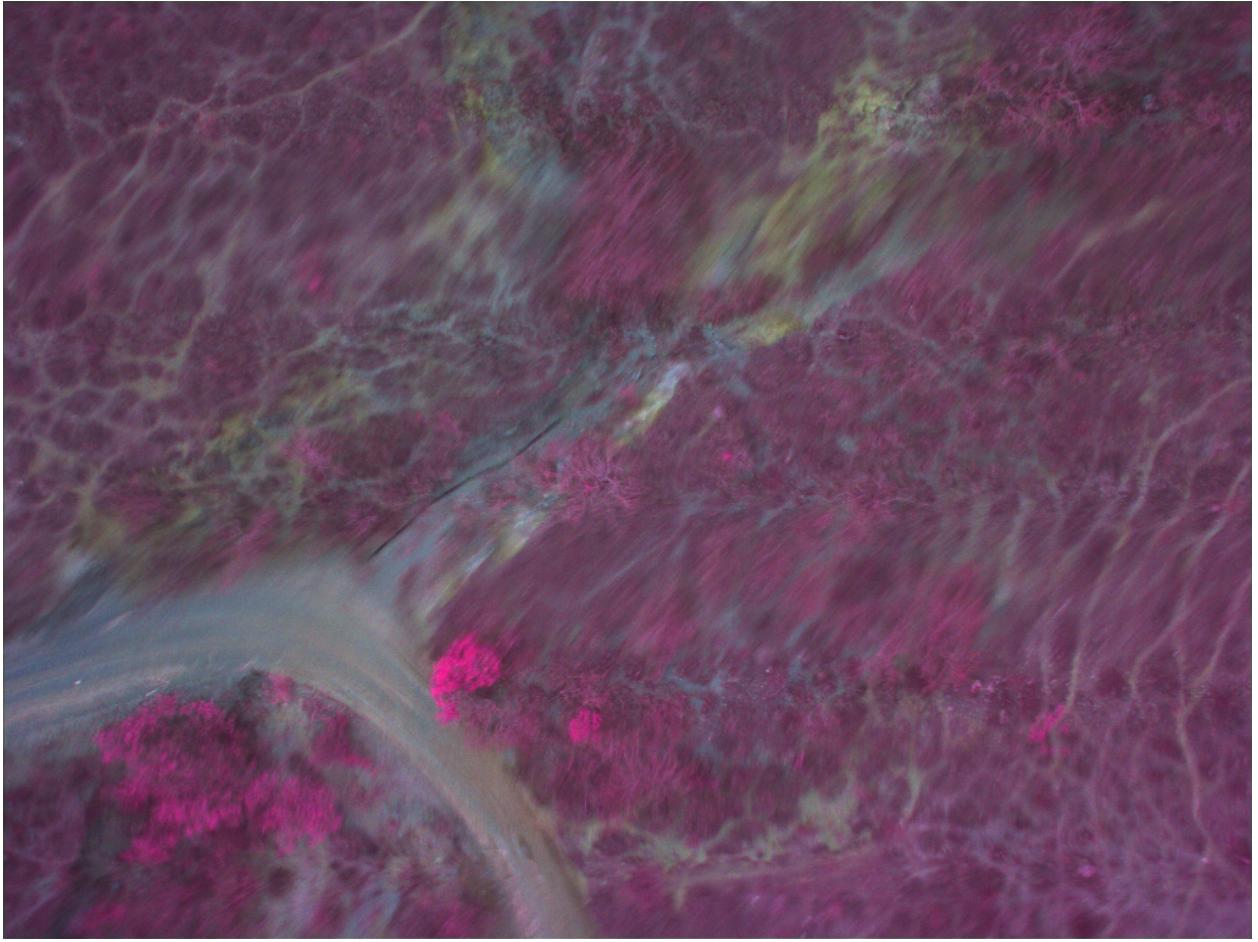


Figura 4: Efecto típico rolling shutter

se realiza desde plataformas móviles que se desplazan con relativa rapidez (imagen 4). En este estudio, las imágenes están severamente afectadas por este fenómeno, imposibilitando la identificación de puntos homólogos entre imágenes y por tanto la adecuada optimización de los parámetros de calibración para cada una de las tomas aéreas, condición previa al procesamiento fotogramétrico.

Para minimizar el efecto rolling shutter lo más apropiado es emplear algún sistema estabilizador de la cámara que pueda amortiguar las vibraciones propias del RPAS y corregir las oscilaciones de la plataforma con objeto de mantener el sensor en posición perpendicular respecto a la superficie de estudio. Adicionalmente conviene calibrar adecuadamente el RPAS y optimizar el plan de vuelo. En este sentido, la velocidad y la altura de vuelo son los factores más importantes a tener en cuenta. Una mayor altura podría reducir teóricamente los artefactos típicos del rolling shutter, además de acortar los tiempos de vuelo en detrimento de una menor resolución espacial. Sin embargo, hay que tener en cuenta las restricciones legales que impiden volar por encima de una altura superior a los 122 metros en Ecuador. Por otro lado, una menor velocidad de vuelo aumentaría considerablemente los tiempos de la operación, aunque incidiría positivamente en la calidad de las imágenes. En cualquier caso, para parcelas de pequeño tamaño, podría ser adecuado realizar un sobrevuelo perpendicular a la zona de estudio. La altura de vuelo requerida para cubrir completamente la zona de estudio es fácilmente calculable a partir del ángulo de visión (FOV) de la cámara. Este planteamiento es fácilmente implementable, menos arriesgado y requiere un menor despliegue de recursos.

4.3 Calibración geométrica

El error cuadrático medio durante la fase de georreferenciación se situó por debajo de los 40 píxeles por escena, salvo para el vuelo 3, en el que debido a la mayor superficie a georreferenciar y la inadecuada distribución de los puntos de control, el error reportado fue mayor. Este error se mantuvo relativamente constante en todos los puntos para cada parcela y no debe afectar el cálculo de los índices, por lo que no se consideró necesario optimizar la georreferenciación. Sin embargo hay que tener en cuenta que los IV fueron calculados a partir de imágenes individuales, debido a la imposibilidad para generar los mosaicos. Por tanto, es de esperar que el procesamiento fotogramétrico de las imágenes mejoraría drásticamente por medio del uso de dianas adecuadamente distribuidas por el terreno y correctamente posicionadas mediante GPS diferencial o estación total. Esto es particularmente importante fuera de áreas urbanas, donde suele ser más complicado identificar puntos homólogos entre imágenes.

4.4 Calibración radiométrica

El cálculo de reflectividades es especialmente importante cuando se trabaja en diferentes condiciones de iluminación, fechas o sensores, por lo que la mejora en el procedimiento de calibración radiométrica de las imágenes debería ser una de las necesidades prioritarias en estudios de vegetación. En caso contrario los IV deben ser interpretados cualitativamente. En términos generales, sería recomendable usar valores de exposición fijos durante toda la operación y en función de las condiciones de iluminación in situ, con objeto de facilitar la calibración radiométrica. El uso de paneles de calibración con reflectividades conocidas permitiría aproximar los niveles digitales de las imágenes a valores físicos de reflectancia, siguiendo alguno de los procedimientos establecidos en otros estudios. Por lo general el método lineal de calibración empírica (Smith and Milton, 1999) suele dar resultados aceptables y es el más ampliamente utilizado. En este estudio se utilizó una muestra de los niveles digitales obtenidos a partir de una placa de teflón fotografiada con anterioridad a cada vuelo. Para obtener una muestra suficiente es necesario que la placa cubra la mayor parte de la imagen y que no aparezca sobreexpuesta. En nuestro estudio no se cumplieron ninguno de los dos requisitos. En cualquier caso, este procedimiento serviría únicamente para aproximar valores de reflectancia relativa, comparables a lo sumo para índices generados en un mismo día. Actualmente la calibración radiométrica de las imágenes obtenidas mediante RPAS está en fase constante de investigación. La aparición de una nueva generación de sensores multiespectrales y paneles de calibración adecuados proporcionan una mayor solidez a los resultados.

Agradecimientos

Agradecimientos por el apoyo recibido en los trabajos de campo al personal de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL) y la empresa Kea Electronics.

5 Anexo

5.1 Estadísticos

Cuadro 3: Índices de vegetación totales

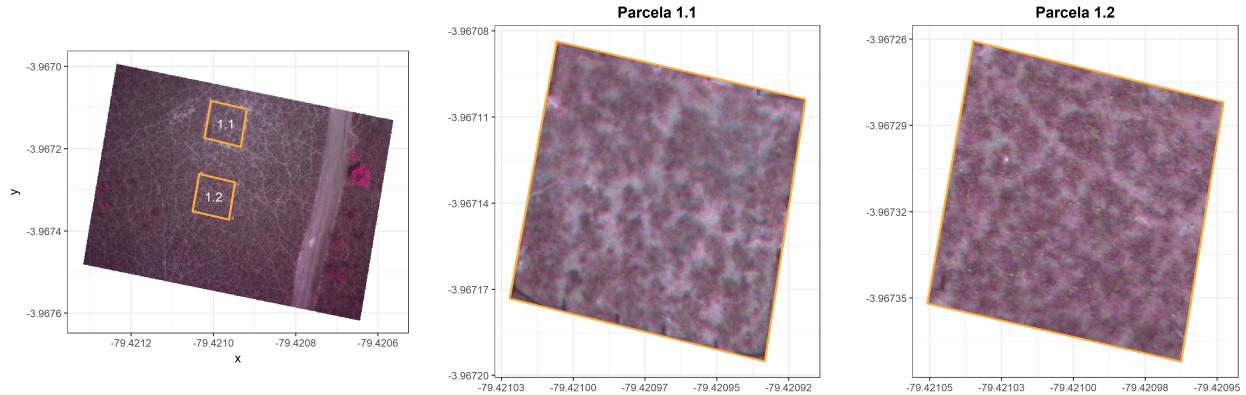
ind	mean	median	max	min	sd
NDVI	0.1396795	0.1369355	0.7888946	-0.4423651	0.0734385
MSAVI2	0.2379044	0.2408821	0.8819896	-1.5864547	0.1126259
GNDVI	0.0193508	0.0193178	0.3138509	-0.3307167	0.0486787

Cuadro 4: Índices de vegetación por gradiente altitudinal (vuelos)

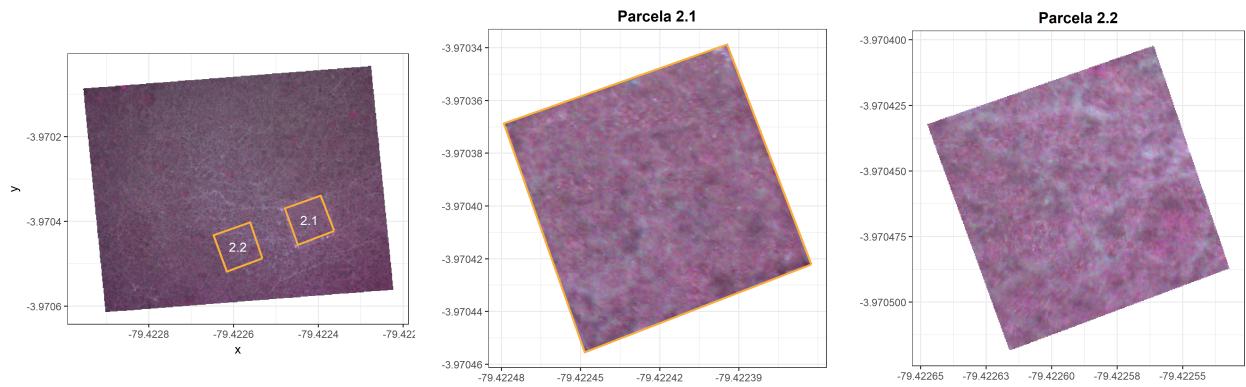
ind	flight	mean	median	max	min	sd
NDVI	1	0.1296670	0.1271370	0.7888946	-0.4423651	0.0759787
NDVI	2	0.1572704	0.1565326	0.5979065	-0.2354898	0.0658281
NDVI	3	0.1213978	0.1181474	0.7040910	-0.1409042	0.0729591
NDVI	4	0.1553812	0.1534823	0.5798342	-0.2199263	0.0708295
MSAVI2	1	0.2215505	0.2255901	0.8819896	-1.5864547	0.1200708
MSAVI2	2	0.2661634	0.2706892	0.7483582	-0.6160308	0.0993437
MSAVI2	3	0.2093114	0.2113234	0.8263518	-0.3280206	0.1115663
MSAVI2	4	0.2624435	0.2661170	0.7340420	-0.5638444	0.1067918
GNDVI	1	0.0390770	0.0394827	0.3138509	-0.3307167	0.0470861
GNDVI	2	0.0128789	0.0133204	0.2114307	-0.2318848	0.0430949
GNDVI	3	0.0033402	0.0035652	0.2530240	-0.2008531	0.0471353
GNDVI	4	0.0282264	0.0293981	0.2429195	-0.2472101	0.0481237

5.2 Ortomosaicos

5.2.1 Vuelo 1



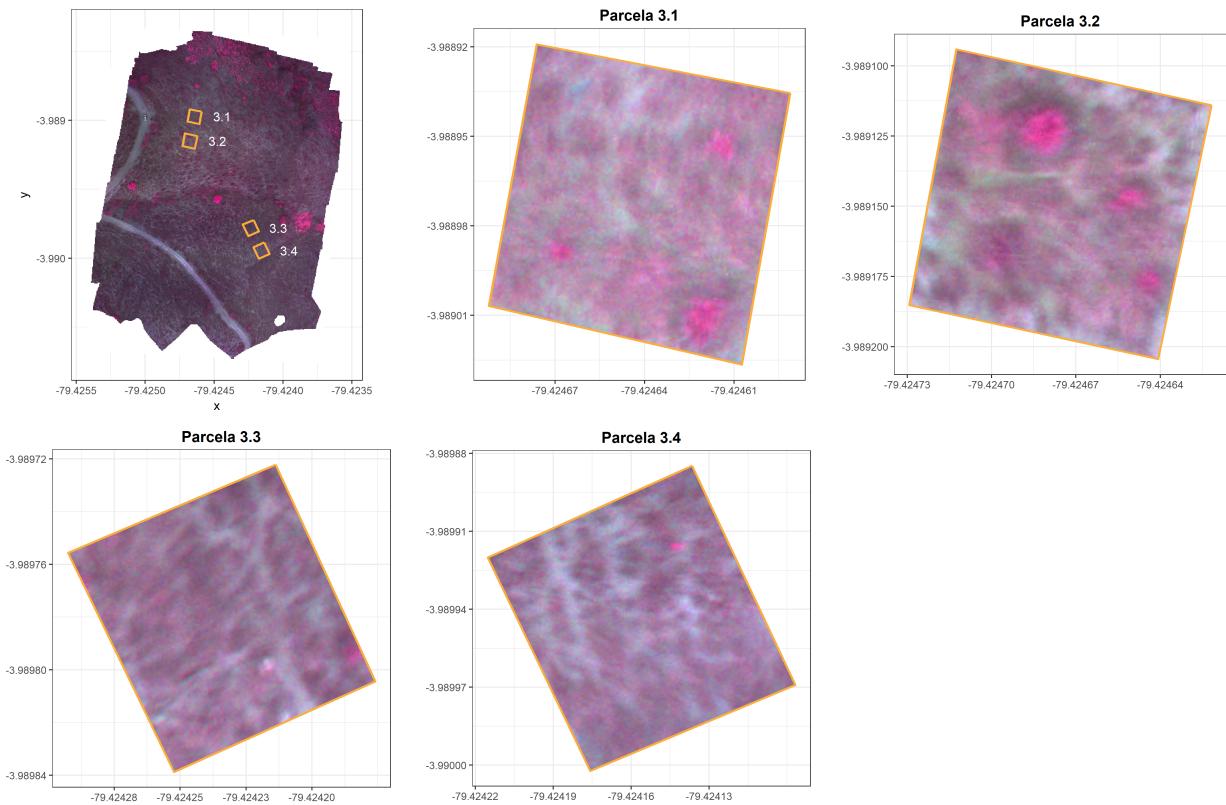
5.2.2 Vuelo 2



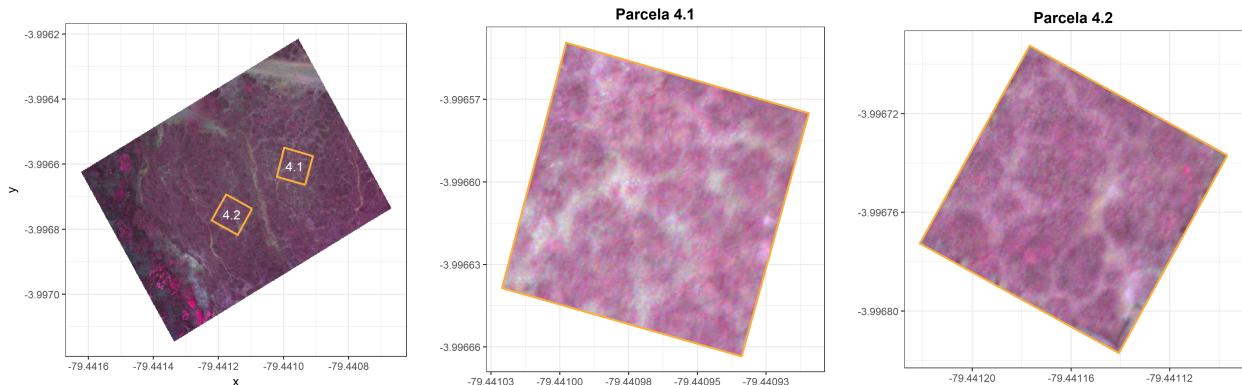
Cuadro 5: Índices de vegetación por parcelas

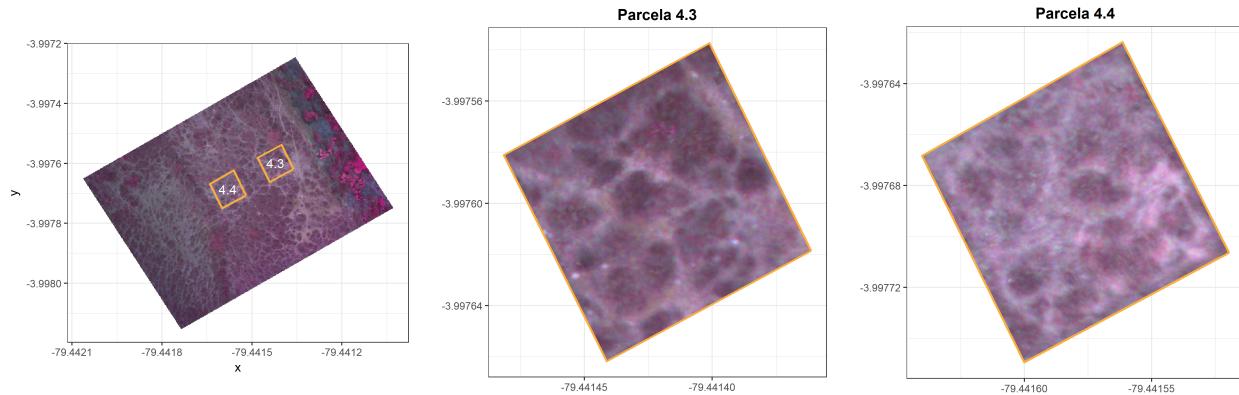
ind	.id	mean	median	max	min	sd
NDVI	p11	0.1115298	0.1093149	0.6789593	-0.3911617	0.0705064
NDVI	p12	0.1477596	0.1456597	0.7888946	-0.4423651	0.0769219
NDVI	p21	0.1616221	0.1607373	0.5979065	-0.2049998	0.0640664
NDVI	p22	0.1528952	0.1518418	0.5271614	-0.2354898	0.0672702
NDVI	p31	0.1246447	0.1205831	0.5724941	-0.1276600	0.0739729
NDVI	p32	0.1242078	0.1135236	0.7040910	-0.1409042	0.0923983
NDVI	p33	0.1274104	0.1277553	0.4663089	-0.1128611	0.0573718
NDVI	p34	0.1092773	0.1095825	0.5516765	-0.1129146	0.0592624
NDVI	p41	0.1662771	0.1688380	0.4901818	-0.2045846	0.0694682
NDVI	p42	0.1964815	0.1972639	0.5798342	-0.0779372	0.0653344
NDVI	p43	0.1368097	0.1349256	0.5217252	-0.2000914	0.0609464
NDVI	p44	0.1123248	0.1106322	0.3985167	-0.2199263	0.0555369
MSAVI2	p11	0.1934562	0.1970827	0.8087823	-1.2848808	0.1145325
MSAVI2	p12	0.2495756	0.2542776	0.8819896	-1.5864547	0.1189139
MSAVI2	p21	0.2729907	0.2769535	0.7483582	-0.5157088	0.0960530
MSAVI2	p22	0.2592993	0.2636461	0.6903772	-0.6160308	0.1020873
MSAVI2	p31	0.2142975	0.2152112	0.7281318	-0.2926750	0.1127622
MSAVI2	p32	0.2099254	0.2038969	0.8263518	-0.3280206	0.1358011
MSAVI2	p33	0.2214214	0.2265616	0.6360270	-0.2544299	0.0906675
MSAVI2	p34	0.1918564	0.1975166	0.7110690	-0.2545668	0.0969995
MSAVI2	p41	0.2789359	0.2888951	0.6578782	-0.5143943	0.1045245
MSAVI2	p42	0.3233867	0.3295206	0.7340420	-0.1690460	0.0926396
MSAVI2	p43	0.2356386	0.2377674	0.6856991	-0.5002749	0.0945126
MSAVI2	p44	0.1974773	0.1992206	0.5699077	-0.5638444	0.0900616
GNDVI	p11	0.0266924	0.0268910	0.3138509	-0.2242873	0.0469408
GNDVI	p12	0.0514311	0.0512642	0.2593017	-0.3307167	0.0438763
GNDVI	p21	0.0191072	0.0197479	0.2114307	-0.2318848	0.0424443
GNDVI	p22	0.0066170	0.0067354	0.2033380	-0.1685503	0.0428361
GNDVI	p31	0.0148962	0.0149040	0.2368022	-0.1915286	0.0432251
GNDVI	p32	0.0216830	0.0211112	0.2530240	-0.1876830	0.0481303
GNDVI	p33	-0.0014523	-0.0011751	0.1825909	-0.1825140	0.0403691
GNDVI	p34	-0.0231511	-0.0222579	0.1916022	-0.2008531	0.0428077
GNDVI	p41	0.0507431	0.0512225	0.2108868	-0.1413049	0.0406018
GNDVI	p42	0.0511864	0.0516566	0.2429195	-0.1905495	0.0390907
GNDVI	p43	0.0122107	0.0118657	0.2034398	-0.2472101	0.0435647
GNDVI	p44	-0.0096494	-0.0101914	0.1588499	-0.1889714	0.0392273

5.2.3 Vuelo 3



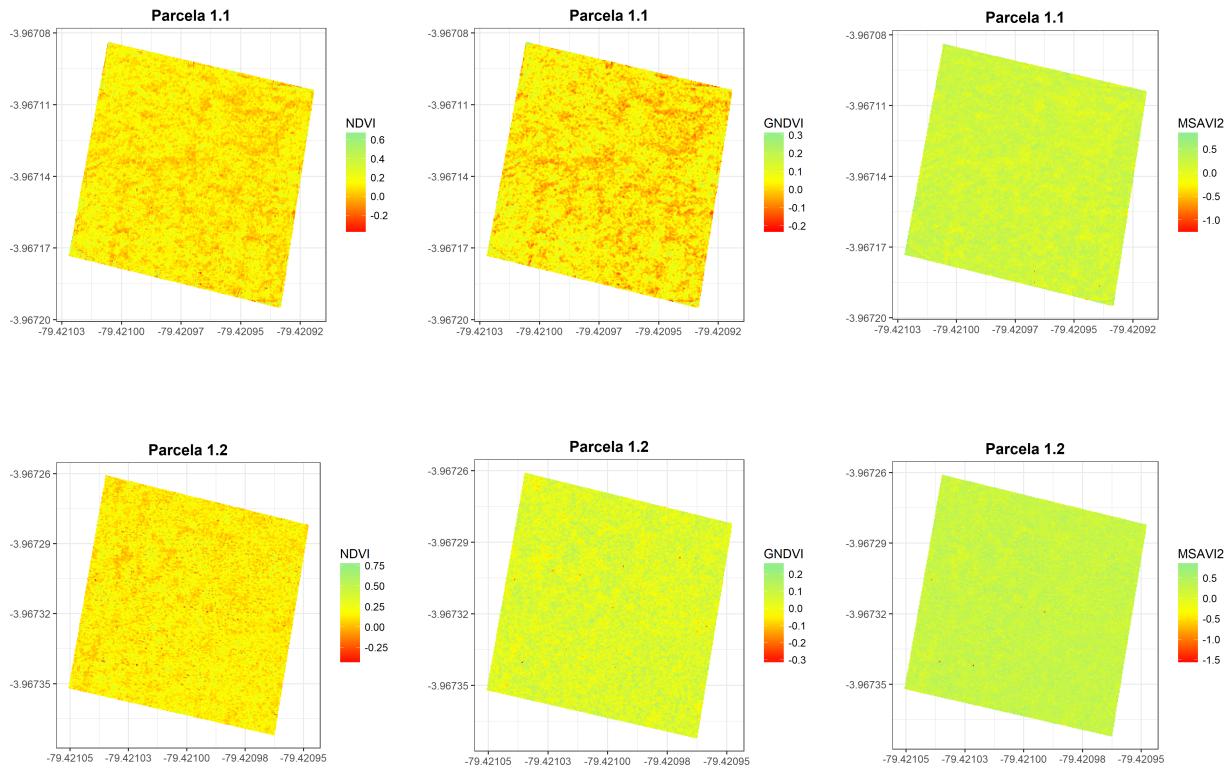
5.2.4 Vuelo 4

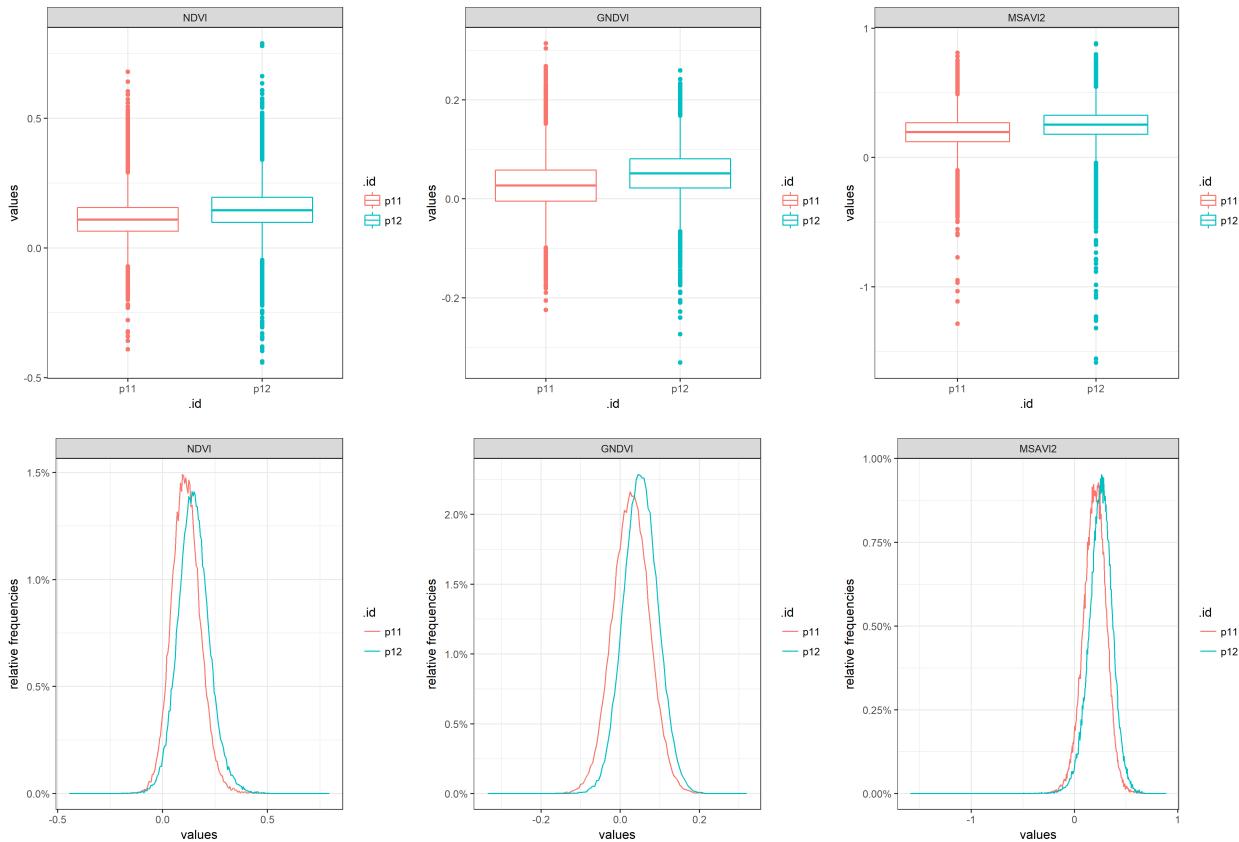




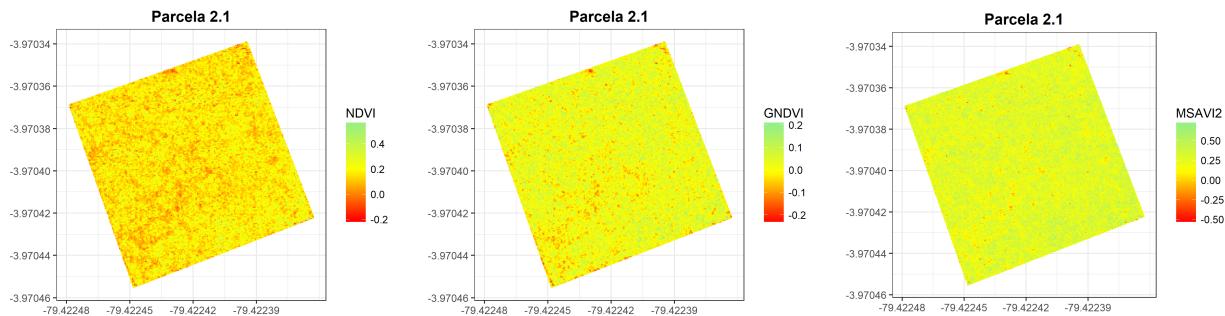
5.3 Índices de vegetación

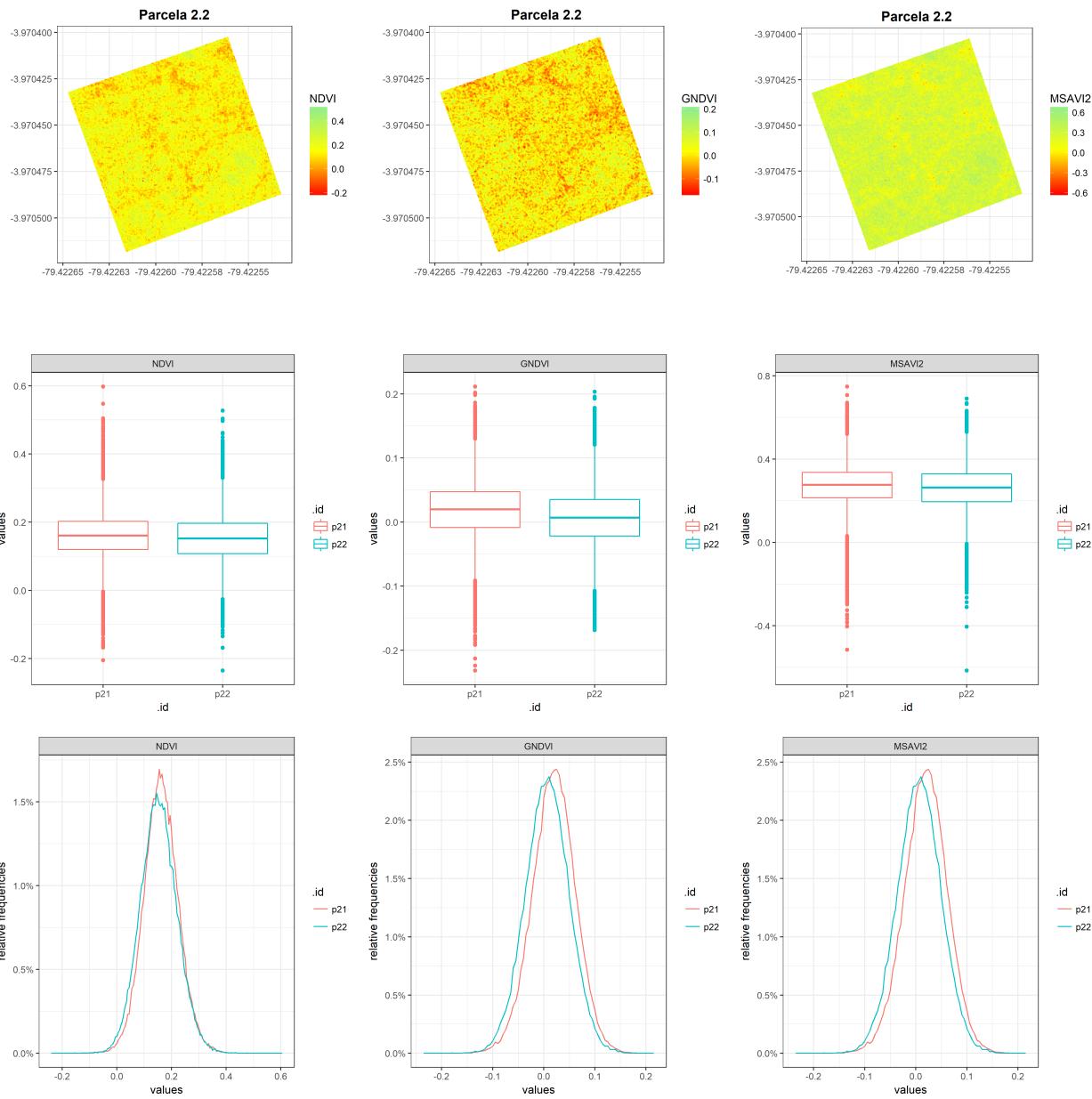
5.3.1 Vuelo 1



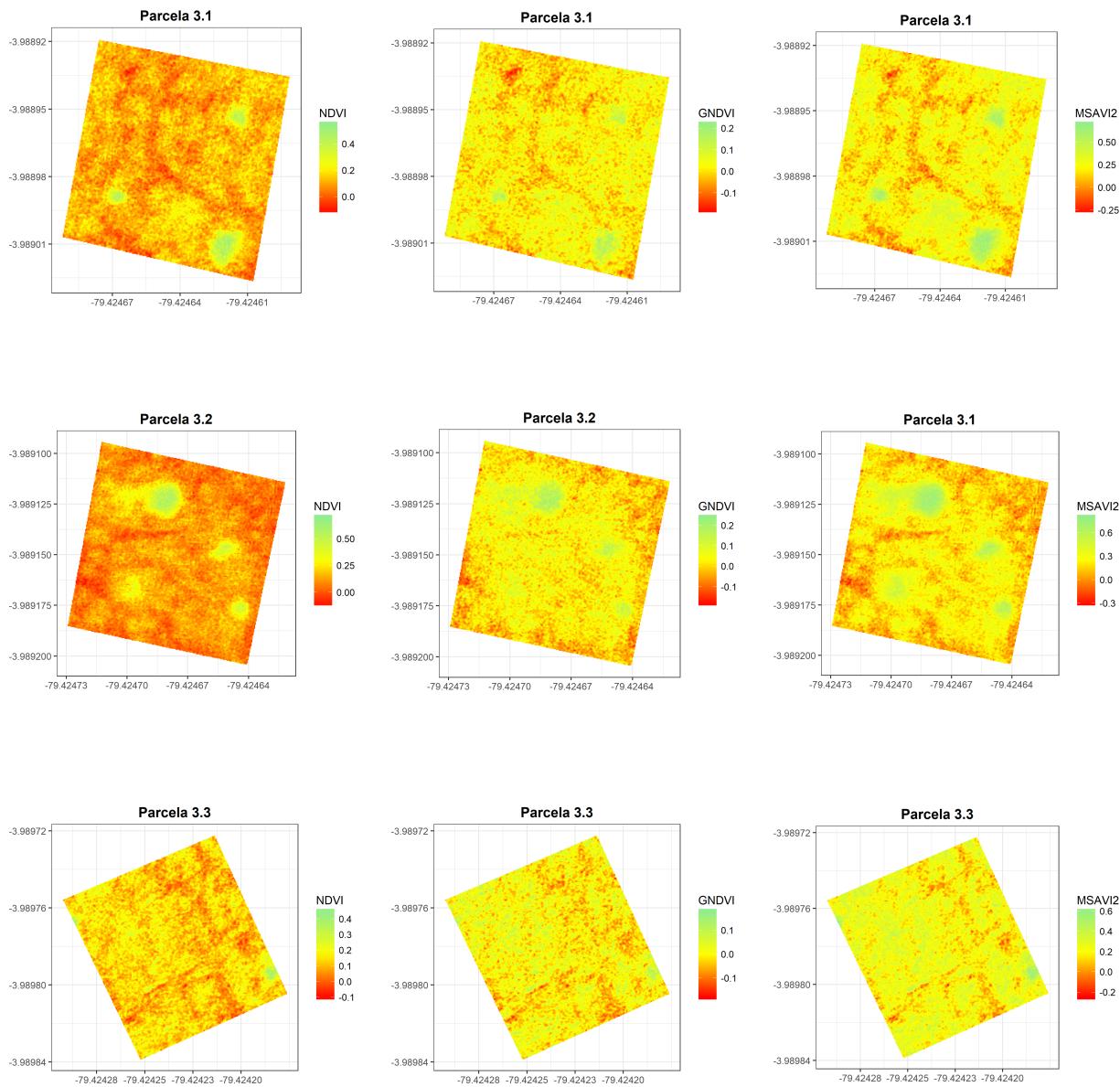


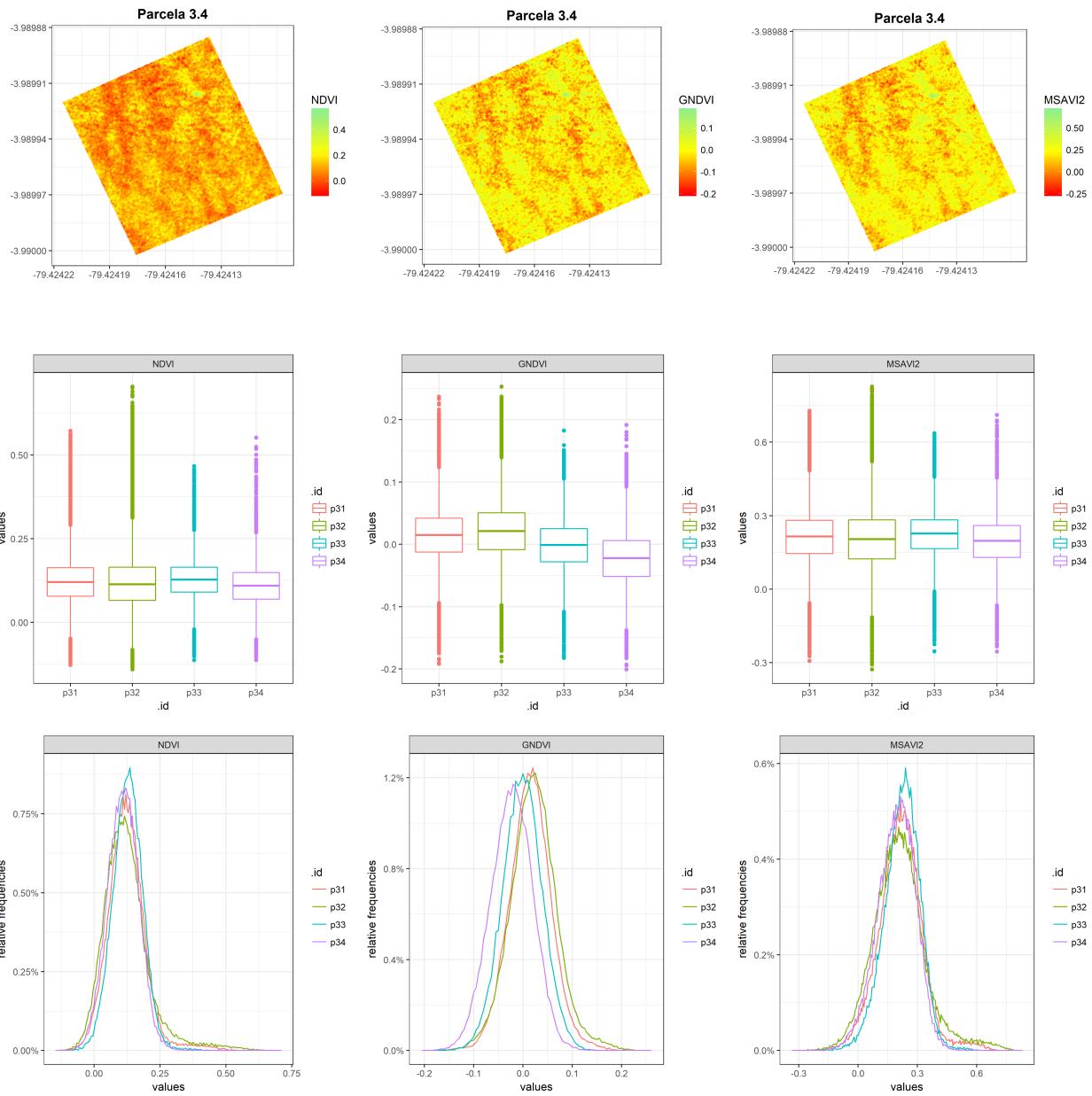
5.3.2 Vuelo 2



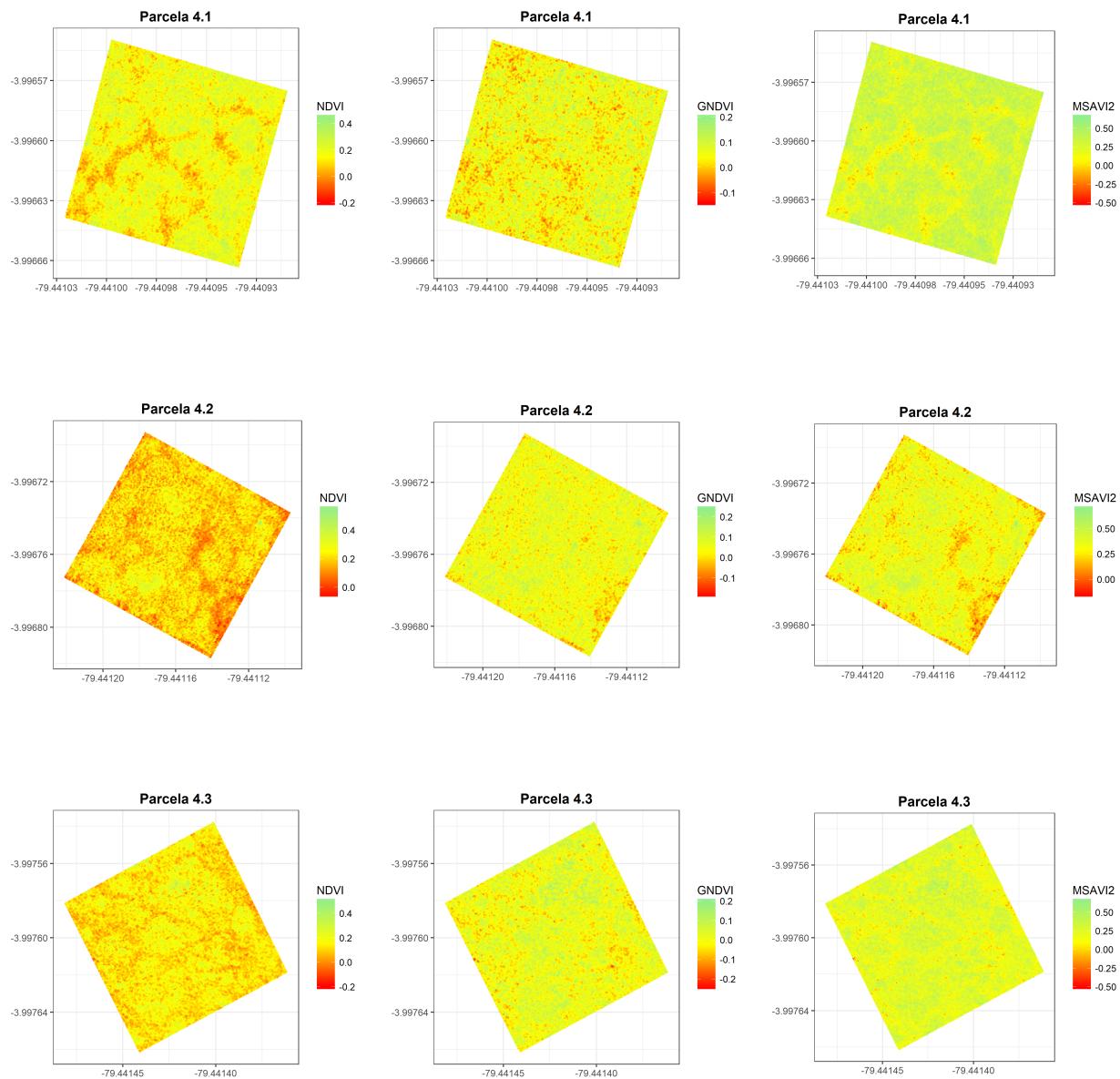


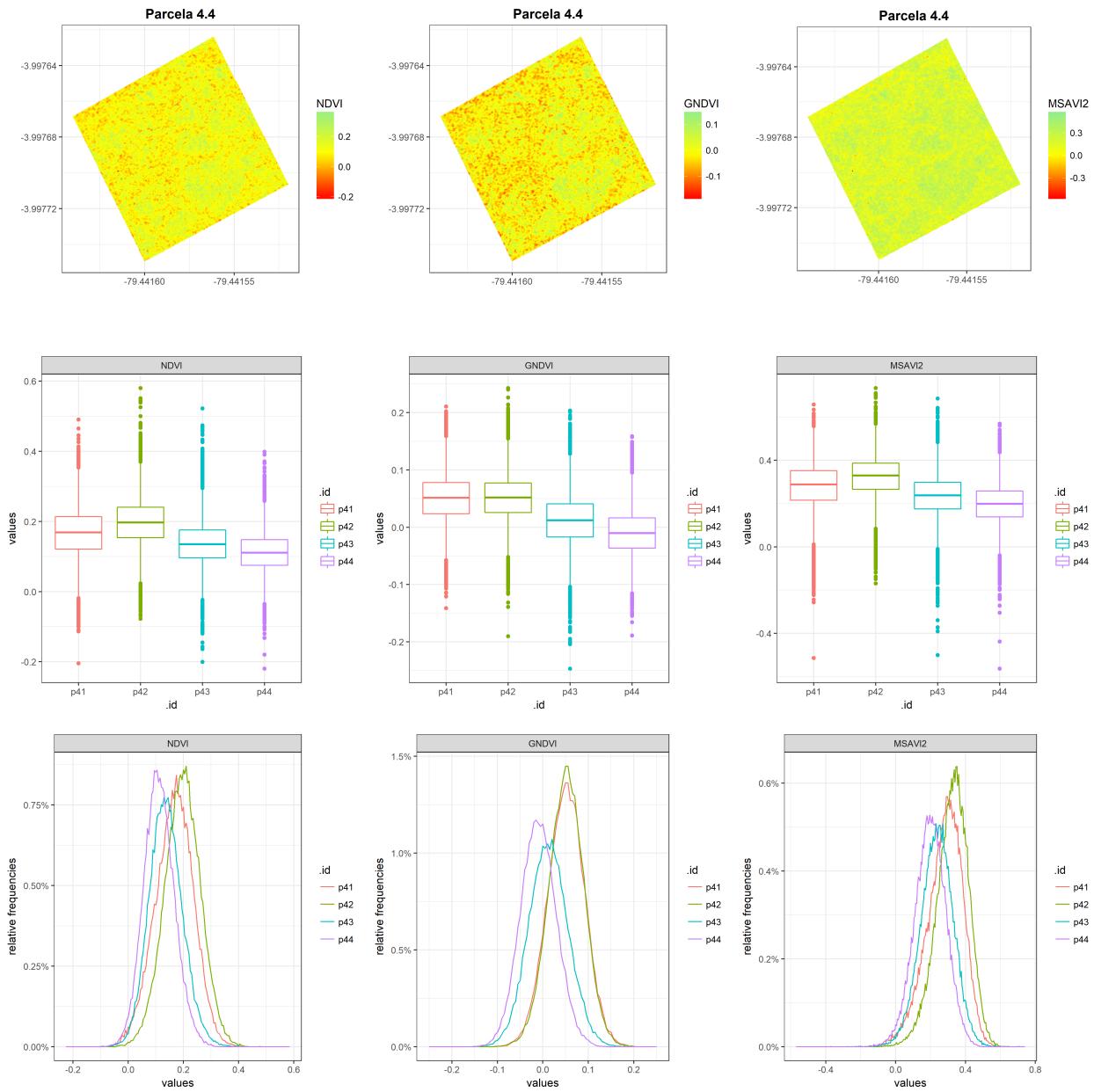
5.3.3 Vuelo 3





5.3.4 Vuelo 4





Referencias

- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., and Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1-2):95–120.
- Chuvieco Salinero, E. (2006). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel,
- Espinosa, C. I., Luzuriaga, A. L., de la Cruz, M., and Escudero, A. (2014). Climate and grazing control nurse effects in an Ecuadorian dry shrubby community. *Journal of Tropical Ecology*, 30(01):23–32.
- Gillespie, T. W. (2011). Predicting Woody-Plant Species Richness in Tropical Dry Forests : A Case Study from South PREDICTING WOODY-PLANT SPECIES RICHNESS IN TROPICAL DRY FORESTS : A CASE STUDY FROM SOUTH FLORIDA , USA. *Ecological Applications*, 15(1):27–37.

- Gitelson, A. A. and Merzlyak, M. N. (1998). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*, 22(5):689–692.
- Jiménez, J. (2018). Python geotag script for tetracam. https://github.com/jesusjl/geotag_tetracam.
- Koh, L. P. and Wich, S. A. (2012). Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical Conservation Science*, 5(2):121–132.
- Leutner, B. and Horning, N. (2017). *RStoolbox: Tools for Remote Sensing Data Analysis*. R package version 0.1.10.
- Levin, N., Shmida, A., Levanoni, O., Tamari, H., and Kark, S. (2007). Predicting mountain plant richness and rarity from space using satellite-derived vegetation indices. *Diversity and Distributions*, 13(6):692–703.
- Madonsela, S., Cho, M. A., Ramoelo, A., Mutanga, O., and Naidoo, L. (2018). Estimating tree species diversity in the savannah using NDVI and woody canopy cover. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 66(November 2017):106–115.
- Pettorelli, N. (2013). *The normalized difference vegetation index*. Oxford University Press.
- QGIS (2017). *QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. QGIS version 2.14.21 Essen.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., and Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2):119–126.
- R Core Team (2017). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J., and Deering, D. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium*, 1:309–317.
- Sierra, M. et al. (1999). *Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental*. Proyecto Inefan/Gef-Birf y Ecociencia.
- Smith, G. M. and Milton, E. J. (1999). The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 20(13):2653–2662.
- Wang, K., Franklin, S. E., Guo, X., and Cattet, M. (2010). Remote sensing of ecology, biodiversity and conservation: A review from the perspective of remote sensing specialists. *Sensors*, 10(11):9647–9667.